مقدمة في
الفلك الكيميائي

تأليف الأستاذ دكتور: مجدي يوسف أمين
صالح
أستاذ كيمياء الفضاء والفلك
بقسم الفلك كلية العلوم
جامعة القاهرة

الفهرس

المقدمـة

إن النظرة غير المتأنية إلى السماء ، تجعلك تعتقد أنها أزلية أبدية وغير متغيرة ، حقا ، إن السماء التي نراها ليلا ، لا تختلف عن السماء التي رآها أسلافنا . لكن دوامها محير . كما أن النجوم تبث كميات ضخمة من الإشعاع ، وهذا الفاقد ، لابد أن ينشأ عنه تغيرات تهيئ النجوم للتطور. وبحسابات دقيقة وأرصاد لا تقل دقة طور الفلكيون نظرية تطور النجوم ؛ وتناقش هذه النظرية كيف تولد النجوم من سحب عظيمة من الغاز والغبار . وكيف يعمر الناضج ويهرم ، وبعضها ينتفخ لينفجر إلى شظايا تتناثر في الوسط البين نجمي حيث تمده بمادة جديدة تساهم في بناء أجيال جديدة من النجوم . وتبدو النجوم كأنها لا تتغير عبر الأعمار البشرية الصغيرة بالنسبة للأحداث النجمية التي تحتاج إلى أعمار عظيمة . وقد تستغرق بعض مراحل حياة النجوم ملايين وقد تكون بلايين من السنين .

الكون ذلك المعمل الطبيعي الذي يحوي من المتغيرات ما يدهش ويحير العقل البشري. ولقد أسهمت كثير من الحضارات في فهم طبيعة هذا الكون وتركيبه. حيث كانت نظرة تلك الحضارات إلى الكون نظرة وصفية لما تراه أبصارهم وتقيسه أجهزتهم البدائية دون الدخول في كيفية التركيب ، ولكنها تركت بصمات واضحة مازلنا نستخدمها حتى اليوم.

واستمر الحال على ما هو علية حتى أدخل جاليليو في بداية القرن السابع عشر (عام 1609) المناظير في الأرصاد الفلكية ، فانفتح الكون أمام الإنسان. وبتقدم تلك الصناعة في القرن التاسع عشر ، ثم تطويرها على يد وليم هرشل من مناظير كاسرة للضوء يستخدم في صناعتها العدسات إلى مناظير عاكسة للضوء يستخدم في صناعتها المرايا. وبالتالي أصبح الإشعاع وسيلة الفلكي لدراسة الأجرام السماوية من حيث اللمعان والتركيب الطيفي ، ويرجى من ذلك الحصول على الأحوال الطبيعية والتركيب الكيميائي والتركيب الداخلي لتلك الأجسام. والإشعاع هو انتشار الطاقة على شكل موجات أو جسيمات مادية. والطاقة التي تسقط في كل ثانية على مساحة واحد سم^2 تعرف بشدة أو قوة الإشعاع. والنجوم تصدر كلا الإشعاعيين ، فالإشعاع الموجي تمثله الموجات الكهرومغناطيسية ،

وباكتشاف ظاهرة التحليل الطيفي للضوء بواسطة المنشور الزجاجي تمكن الإنسان من استخدام المطياف لتحليل ضوء النجوم ودراسته بعدما تمكن الفيزيائيون من إيجاد العلاقة بين ألوان الطيف ودرجات الحرارة وباقي الخواص الفيزيائية ، كما في الجدول التالي :

درجة الحرارة	**الطول الموجي للون بالأنجشتروم**		**الطاقة المنبعثة من 1سم^2 (وات/سم^2)**
1000	2900	تحت الأحمر	5.8
4000	7200	الأحمر	$1.5x10^3$
7000	4120	البنفسجي	$1.4x10^4$
10000	2900	فوق البنفسجي	$5.8x10^4$
1000000	29	نطاق رونتجن	$5.8x10^{12}$

نطاق رونتجن : هو الأشعة غير المرئية وأطوال موجاتها محصورة بين 100 إلى 0.01

أنجشتروم. وتعرف أشعة رونتجن التي تقل موجتها عن 0.1 إلى 0.01 أنجشتروم بأشعة جاما

و المطياف جهاز يمكن بواسطة تحليل شعاع كهرومغناطيسي إلى طيفه ، أي إن المطياف ينظم إشعاع الموجات المختلفة الصادرة كخليط من المنبع الإشعاعي تبعا لأطوالها الموجيه حيث تنكسر الموجات القصيرة بدرجة أقوى من انكسار الموجات الطويلة. كما يمكن تحويل الإشعاع غير المرئي إلى مستقبلات مثل الخلايا الكهروضوئيه التي نستطيع عن طريقها الإحساس بالإشعاع.

وبإدخال التصوير الفوتوغرافي في علم الفلك ، تمكن فراونهوفر (1787 – 1826) في عام 1814 من قياس 500 خط من طيف الشمس. واستنتج كيرشوف (1824-1887) وبنسون (1811-1892) من مقارنة خطوط فراونهوفر لطيف العناصر الأرضية في المعامل. وجاءت الدراسات الطيفية للشمس في نهاية القرن التاسع عشر في أبحاث رولاند (1848-1901) ، والذي قاس ما يقرب من 20000 خط طيفي. وبمرور الزمن اكتشف تطابق خطوط كثيرة منها مع أطياف العناصر الأرضية. وقد أتت الأبحاث على أطياف البقع الشمسية بتقدم آخر حيث أثبتت وجود مركبات كيميائية في تلك البقع. وفي عام 1868 قام سيخي (1818-1878) بدراسة أطياف النجوم وتقسيمها حسب أطيافها. ثم تعرف هيجنز (1824-1910) بعد ذلك على خطوط الهيدروجين ومعادن أخرى في طيف النجوم. وفي عام 1868 اكتشف عنصر الهليوم في طيف الشمس قبل أن يُكتشف على سطح الأرض في عام 1895. ومن دراسات وولف (1863-1932) استنتج أن الفراغ البين نجمي يحتوي على غازات وأتربة كونية وسمي هذا بمادة ما بين النجوم. وفي عام 1904 تم اكتشاف خطوط الطيف لذرة الصوديوم وأيون الكالسيوم في مادة بين النجوم الموجودة في منطقة الجبار على يد هارثمان. وبتركيز الدراسة على تلك المادة تم اكتشاف أول ثلاث مركبات كيميائية معقدة ـ الميثيلدين CH وأيونه CH^+ والسيانوجين CN في عام 1922 .بذلك أمكن إثبات أنة من العناصر الموجودة على سطح الأرض توجد بعضها على الأقل في أجواء الشمس والنجوم. ومن هنا تأكد وحدة مادة بناء الكون.

وبعد انتهاء الحرب العالمية الثانية واستخدام أطباق الرادار كمناظير راديويه أدى هذا إلى فهم أعمق لتركيب مادة ما بين النجوم ، ثم تم رصد طيف الهيدروجين عند الطول الموجي 21 سم بواسطة فان دي هولست في عام 1944. ثم منذ عام 1969 تم اكتشاف الجزيئات العضوية في تلك المادة.

وبعد تطور المناظير الراديويه وطرق الأرصاد الفلكية باستخدام الصواريخ والأقمار الصناعية وسفن الفضاء والكاميرات شديدة الحساسية ، وكذلك تطور أجهزة تحليل أطياف الأرصاد الفلكية باستخدام الحاسب الآلي ، تم اكتشاف طيف أكثر من 147 عنصر ومركب كيميائي في مادة ما بين النجوم ، والنجوم ذي درجات الحرارة المنخفضة بشكل كبير ، والبقع السوداء التي تعتري أسطح النجوم ومنها الشمس.

ونتيجة لهذا الكم الهائل من المعلومات بدأ علم الكيمياء الفلكية في الثلاثين عام الأخيرة من القرن العشرين ، لدراسة كيفية وطبيعة تكوين المركبات الكيميائية في الفضاء وتأثيرها على نظرية تكوين النجوم (لضبط معادلة الطاقة التي لم يستطع العلماء ضبطها بالطرق الفيزيائية) وكذلك على المجالات المغناطيسية في الكون.

بعدما أتضح أمام العلماء أن الكيمياء الأرضية ما هي إلا حالة خاصة من الكيمياء الكونية. بدأت الأبحاث في هذا التخصص الجديد في علم الفلك في المحاور الآتية:

- 1- دراسةُ التفاعلاتِ الكيميائيةِ بين الغازاتِ والغبارِ المبعثر بين النجومِ وعلاقتها بعملية تكوين النجوم ، وكيفية إنْتاج الأحماض الأمينية البسيطةِ، التي تمثل الأساس للكيميائيةِ الحيويةِ. والتي عن طريقها يمكن استنتاج العلاقة بين الحياة على سطح الأرض والفضاء الخارجي .
- 2- دراسة كيمياء أسطح النجوم الباردة التي درجة سطحها أقل من 3500 درجة مطلقة وكذلك للبقع السوداء في الشمس التي درجة حرارتها أقل من درجة حرارة سطح الشمس بحوالي 1500 درجة. وفي هذه الدراسة تم اكتشاف 50 جزئ و8 مركبات متعددة

- 3- دراسة كيمياء الغلاف الجوي للكواكب والنجوم شبيهة الكواكب (النجوم البنية).
- 4- دراسة كيمياء الأغلفة الجوية للكواكب ، ثم دراسة تأثير المواد والعناصر الكيميائية هذه على أسطح الأقمار الصناعية.
- 5- دراسة كيمياء النجوم المتفجرة (السوبر نوفا) وكيفية تكون العناصر أثقل من الحديد والمواد المشعة بعد عملية الأنفجار.
- 6- وضع أول نموذج كيميائي للكون لمعرفة نسبة شيوع العناصر في بداية الكون.
- 7- كيمياء المذنبات

ولقد أخذت على عاتقي إخراج هذا الكتاب بعدما طلب مني كثير من الزملاء وممن يعرف أنني متخصص في هذا المجال الجديد . وهذا الكتاب يشمل على ملخص لقوانين الإشعاع ، و الخطوط العريضة لكيمياء الكون البدائي ، وكيمياء النجوم بنوعيها ، وكيمياء مادة ما بين النجوم. أما كيمياء كواكب المجموعة الشمسية وأقمارها والمذنبات فقد رأيت أن أفرد لها كتابا بذاته.

وفي النهاية أرجو من الله أن يكون هذا الكتاب شمعة أمام الطلاب والباحثين في فهم التخصص الجديد وخصوصا إننا في بداية القرن الجديد.
كما اشكر كل من كان له دور حتى يخرج هذا الكتاب في ثوبه الأخير.
كما أهدي هذا الكتاب إلى زوجتي الحبيبة ، و أولادي الأعزاء ، و إلى أبي وأمي ، و إلى كل من علمني حرف.

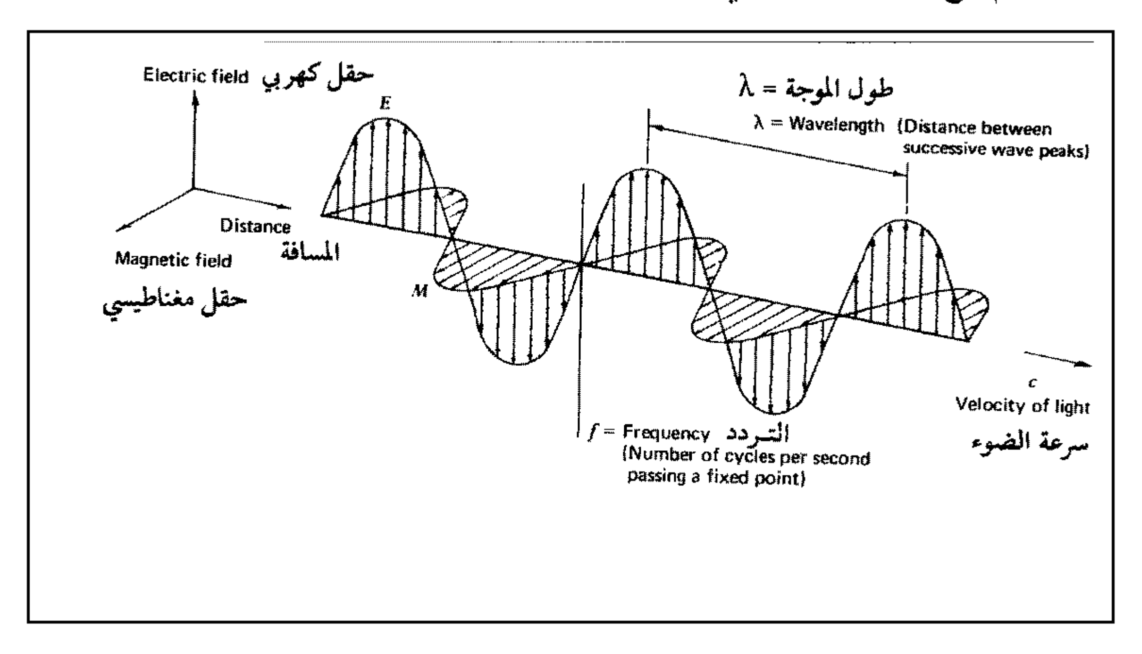
أ.د. مجدي يوسف أمين صالح

الفصل الأول

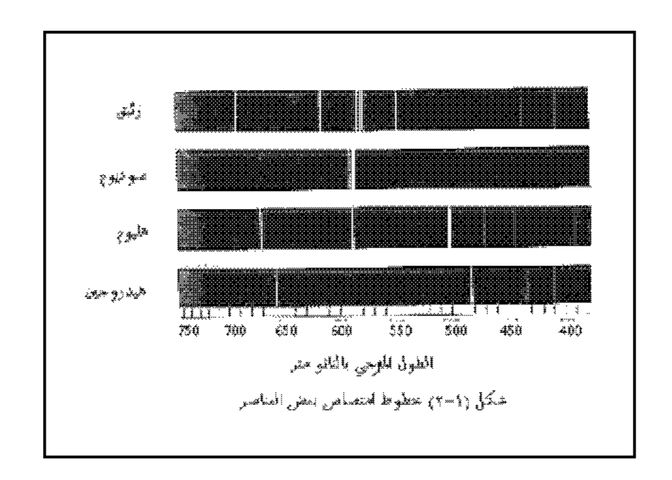
الإشـــعــــاع

1-1 مقدمة

إن الوسيلة الوحيدة لدراسة أجرام السماء ، هي ما تبعث به هذه الأجرام من رسائل تتمثل في الموجات الكهرومغناطيسية electromagnetic بمختلف أطوالها wave length في كافة الاتجاهات .ومعظم هذه الموجات غادرت الجرم الذي بعث بها منذ مدة تتراوح من ثماني دقائق للموجات القادمة من الشمس إلى آلاف بل ملايين السنين للموجات القادمة من النجوم و المجرات البعيدة. والموجات الكهرومغناطيسية هي إشعاع يتكون من حركتين اهتزازيتين متوافقتين تتحركان في مستويين متعامدين مصدر الأول حقل كهربائي والآخر مغناطيسي يشكلان معا حقلا كهرومغناطيسيا . وتتحرك الطاقة الكهرومغناطيسية بشكل دالة الجيب sine function بشكل متناسق مع سرعة الضوء حسب الشكل (1-1) ،حيث تسمى المسافة بين قمة موجة كهرومغناطيسية والقمة التي تليها بطول الموجة ، وتسمى عدد القمم المارة بنقطة ثابتة في الفضاء في وحدة الزمن (ثانية) بالتردد (f) frequency. وسرعة تلك الموجات في الفراغ تساوي 300 ألف كم /ث ،وهي ما يطلق عليه سرعة الضوء ،وتسير في خطوط مستقيمة ما لم تقع تحت تأثير مادي يحيد من مسارها .



والموجات الكهرومغناطيسية لها خاصتان الأولى تفسر على أنها جسيمات كمية أي فوتونات تبعاً لنظرية نيوتن. وفي هذه الخاصية يمكن اعتبار الضوء على أنه تياراً من كتل ذات طاقة معينة. وتعتبر هذه الخاصية مهمة في فهم كيفية امتصاص المواد العضوية للضوء. وتشكل ظاهرة امتصاص أو انبعاث الإشعاع بواسطة الجزيئات عندما يمر خلالها الضوء أساس الطيف.



شكل (١-٢) خطوط امتصاص بعض العناصر

والخاصية الثانية تفسر على أنها موجيه تبعا لنظرية بلانك. وتبعا لقانون بلانك فإن طاقة الفوتون تساوي $E = hf$ ، حيث h هو ثابت بلانك ويساوي $6.62x10^{-27}$ جم سم^2 /ث .

2-1 مكونات الموجات (الأطياف) المغناطيسية

يتكون الطيف الكهرومغناطيسي من خلال تفاعل الموجات الكهرومغناطيسية مع المواد . فعند مرور الضوء خلال مجموعة من الغازات أو الجزيئات فإن الضوء الخارج لايكون مستمراً ، اذ أن بعض الموجات تتحد مع الذرات أو الجزيئات وتُمتص من قبلها ، وبذلك يتهيج (يثار) الجسيم من مستوى طاقة منخفض إلى مستوى طاقة أعلى. ويطلق على هذة العملية بطيف الإمتصاص . ويعطى كل نوع مختلف من الذرات أو الجزيئات طيف امتصاص مميز له. أما طيف الانبعاث فإنة ينشأ عندما يفقد الجزئ أو الذرة طاقته وبذلك تنتقل طاقة الجسيم من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة منخفض.

وفي الجزيئات يعتبر العدد الكلى لمستويات الطاقة كبير جداً لذا فإن الطاقة الكلية تنقسم إلى أنواع حسب المعادلة التالية :

$$E_{total} = E_{translation} + E_{nuclear\ oreintation} + E_{rotation} + E_{vibration} + E_{electronic.} \quad (1\text{-}1)$$

حيث أن $E_{translation}$ هي الطاقة الانتقالية ، و $E_{nuclear\ \ oreintation}$ الطاقة الاتجاهية النووية ،و $E_{rotation}$ طاقة الدوران ، و $E_{vibration}$ طاقة الاهتزاز ، و $E_{electronic}$ الطاقة الالكترونية.

ويعتمد تحديد طاقات الحركة المميزة للجزئ على الفراغ المتوفر لتلك الحركة. فإذا كان الفراغ كبيراً فإن التحديدات تكون قليلة التمييز للطاقة. ويمكن لطاقة هذا النوع من الحركة أن تأخذ أي كمية على المقياس المستمر لذلك فإن دراسة تغييرات الطاقة في مثل هذه الأنواع من الحركة تعتبر ذات أهمية قليلة. أما إذا كان الفراغ محدداً فإن المستويات الكمية للحركة تعتبر ذات أهمية في دراستها. ويمكن توضيح الأنواع المذكورة من الطاقة كما يلي :

1- الطاقة الانتقالية

وتُعزى هذه إلى الحركة الحرة للجسيمات في الفراغ. وتكون مستويات الطاقة للجزيئات مختلفة ومتزايدة بدون حدود. ويمكن للذرة أو الجزئ أن يمتص أي كمية من الطاقة عند انتقاله من موضع لآخر. ويعتبر هذا النوع من أنواع الطاقات ذات أهمية قليلة من الناحية الكمية ويعامل بالوصف التقليدي. وتعطى الطاقة بالمعادلة الآتية :

$$E_{translation} = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1\text{-}2)$$

حيث أن m هي كتلة الجزيئات و v سرعتها.

2- الطاقة الإتجاهية النووية

تعتبر هذه الطاقة مهمة عند دراسة الجزيئات الحاوية على نوى تمتلك لفاً نووياً ذاتياً وتعتمد على توجهات النواة.

3- طاقة الدوران

وهي الطاقة الحركية التي تمتلكها الجزيئات بسبب دورانها حول إحداثي معين خلال مركز الجاذبية. وتكون طاقة الدوران الجزيئية كمية quantized أما المسافات الفاصلة بين مستويات الطاقة للجزيئات الخفيفة (في الطور الغازي) فهي بحدود 10^2 cal. $Gram^{-1}$ mol^{-1} .

4- طاقة الاهتزاز

وتمثل طاقة الجهد والطاقة الحركية التي تمتلكها الجزيئات بسبب حركتها الإهتزازية ، ويمكن اعتبار الذرات في الجزيئات كأنها كتل متمركزة متماسكة مع بعضها بواسطة أواصر تعمل عمل اللولب ، وذلك لأن الجزيئات ليست صلبة وإن حركتها الإهتزازية تنتج بسبب مرونتها (انثنائيتها).

5- الطاقة الإلكترونية

وهي الطاقة التي تمتلكها الجزيئات كنتيجة لطاقة الجهد والطاقة الحركية لإلكتروناتها. وتنتج الطاقة الحركية للإلكترونات نتيجة الحركة ، أما طاقة الجهد فإنها ناتجة من اتحاد الإلكترون مع النواة و إلكتروناتها.

ويستعمل اصطلاح الطيف الكهرومغناطيسي لوصف مجالات الأشعة القصيرة والمتوسطة والطويلة ،وقد قسم إلى مجالات أو موجات طيفية (نطاقات) متصلة كما في جدول الآتي .

نوع الإشعاع		الطول الموجي			العدد الموجي cm^{-1}	التردد Hz	الطاقة $Cal.mol^{-1}$
		انجشتروم	ميكرو متر	سم			
[illegible]	طويل الموجة	10^{14}	10^{10}	10^{6}	10^{-6}	$3x10^{4}$	10^{-6}

	قصير الموجة	10^{12}	10^{8}	10^{4}	10^{-4}	$3x10^{6}$	10^{-4}
	التليفزيون	10^{10}	10^{6}	10^{2}	10^{-2}	$3x10^{8}$	10^{-2}
	الرادار	10^{8}	10^{4}	1	1	$3x10^{10}$	2.85
المايكروويف		10^{7}	10^{3}	10^{-1}	10	$3x10^{11}$	28.5
تحت الحمراء	البعيدة	10^{6}	10^{2}	10^{-2}	10^{2}	$3x10^{12}$	285
	تحت الحمراء						
	القريبة	10^{4}	1	10^{-4}	10^{4}	$3x10^{14}$	28.5
الضوء المرئي		$4x10^{3}$			$24x10^{3}$	$75x10^{13}$	71.4
الفوق بنفسجية		$3x10^{3}$			$3.2x10^{4}$	10^{15}	96
أشعة أكس		1	10^{-4}	10^{-8}	10^{8}	$3x10^{18}$	10^{8}
أشعة جاما		10^{-2}	10^{-6}	10^{-10}	10^{10}	$3x10^{20}$	10^{10}
الأشعة الكونية		10^{-4}	10^{-8}	10^{-12}	10^{12}	$3x10^{22}$	10^{14}

وتتشابه كل هذه الموجات في طبيعتها وتتبع المبدأ الأساسي في التحرك الموجي وتختلف في أطوالها الموجية ،ولا يوجد حدود فاصلة بين مجالات الموجات الكهرومغناطيسية ، ومن الممكن تجزئة المجال الطيفي الواحد إلى مجالات جزئية. وتختلف الخواص الكيميائية والفيزيائية للأنواع المختلفة من الإشعاع ، ويمكن فهم هذا الاختلاف بدلالة الطاقات المختلفة للفوتون. ولتوضيح ميكانيكية الاتحاد بين الإشعاع الساقط والتغيرات الجزيئية أو الإلكترونية يجب أن يكون هناك تأثيراً كهربائياً أو مغناطيسياً ينتج بالتغيرات التي تتأثر بالمجال الكهربائي أو المغناطيسي المرتبط بالإشعاع. ويمكن توضيح تأثير امتصاص الأنواع المختلفة من الإشعاع الكهرومغناطيسي على الجزيئات ابتداءً من المنطقة الأقل طاقة إلي المنطقة الأعلى طاقة كما يلي :

أ-الموجات الراديوية Radio waves:

هي أطول تلك الموجات حيث تصل أطوالها لعدة كيلو مترات . وعندما تمر تلك الموجات بموصل هوائي تحدث تياراً ضعيفاً يمكن تكبيره وتسجيله. ويمكن للشعاع ذو الطول الموجي 1مم و 20مم اختراق الغلاف الجوي الأرضي ليصل إلينا . أما الموجات الأقصر من ذلك فإنها تمتص بواسطة ذرات وجزيئات الجزء السفلي من الغلاف الجوي الأرضي ، بينما الموجات الأطول من ذلك يعكسها الأيونوسفير ثانية في الكون ،بحيث لا تصل إلى سطح الأرض. في النطاق الراديوي يستعمل في الغالب عدد الذبذبات في الثانية بدلا من طول الموجة. وكلا القيمتين ،طول الموجة والذبذبة تربطهما العلاقة :

$$\lambda = c / \nu \qquad (1\text{-}3)$$

حيث c هي سرعة الضوء .وكوحدة للذبذبة يستعمل في الغالب الميجاهرتز ، وواحد ميجاهرتز يساوي مليون ذبذبة لكل ثانية.

والإشعاع الراديوي عبارة عن جزئين : الجزء الأول عبارة عن إشعاع حراري ، فكل جسم يبعث بإشعاع كهرومغناطيسي يتناسب مع درجة حرارته. وبنقص درجة الحرارة تقل كذلك الطاقة المنبعثة ، وتتزحزح مع ذلك المنطقة ذات الإشعاع الأكبر ناحية الموجات الأطول (سوف نشرح هذا في قوانين الإشعاع). من هنا فإن جسماً في درجة حرارة الغرفة لا يشع في النطاق البصري ، يمكن بأن يبعث بأشعة راديوية محسوسة.

وينشأ الإشعاع الراديوي الحراري في مناطق تحتوي غاز ما بين النجوم ،الذي يوجد فيه الهيدروجين متأيناً ، وكذلك من السدم الكوكبية والمجموعة الشمسية.

أما الجزء الآخر من الإشعاع فهو غير حراري وينبعث هذا أثناء تذبذب البلازما فإذا ما أزيحت الإلكترونات السالبة بالنسبة للأيونات الموجبة بقوة ما في البلازما (أي في غاز متأين) فإن قوة الجذب تعمل كقوة معاكسة وتؤدي إلى الذبذبات . وينشأ هذا الإشعاع في مجموعة سكة التبانة (اللبانة) والسدم الإنبعاثية الكثيفة والمجموعة الشمسية.

ب- المايكروويف Microwave :

يتراوح الطول الموجي في هذه المنطقة بين واحد سنتيمتر إلى مائة ميكرو متر. وحيث أن طاقة الفوتون في هذه المنطقة صغيرة جداً ، لذا يمكن للفوتونات أن تنبعث في هذه المنطقة نتيجة الانتقال بين مستويات الطاقة الدورانية فقط. ويحصل الامتصاص عند ترددات معينة تُحدّد بواسطة عزم القصور الذاتي للجزيئات الغازية. ويستفاد من أطياف

ج-الموجات الحرارية (تحت الحمراء) Infrared:

وهذه الأشعة تتراوح أطوالها الموجية بين 7×10^{-4} mm إلى 1mm .ويمكن تصوير ما تقل أطواله عن $15\text{x}10^{-4}$ مم بألواح خاصة فوتوغرافية مكونة من خلايا كبريتات الرصاص .أما الموجات الأطول من ذلك فتسجل باستخدام أجهزة فلكية مكونة من أنصاف الموصلات الكهربائية التي تحول الشعاع الملتقط إلى إشارة كهربية مباشرة.

والإشعاع تحت الأحمر لا ينفذ كلياً من خلال الغلاف الجوي ولكن بصورة جزئية نتيجة لامتصاص بخار الماء H_2O وثاني أكسيد الكربون CO_2 ومنبع موجات تحت الحمراء في السماء هي النجوم الباردة جدا وكذلك النجوم التي في مرحلة التكوين ، حيث وجود الجزيئات الكيميائية.

وفي منطقة تحت الحمراء يدرس الأطياف الناتجة من الانتقال بين مستويات الطاقة التذبذبية للجزيئات. أما في منطقة تحت الحمراء البعيدة يدرس الأطياف الناتجة من دوران الجزيئات. وفي منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة تكون طاقة الكم التي يمتصها الفوتون كبيرة نسبياً بحيث يمكن أن تحصل انتقالات اهتزازية إضافة إلى الانتقالات الدورانية ، وتكون الأطياف في هذه المنطقة معقدة جداً بسبب تداخل الانتقالات الدورانية مع الانتقالات الاهتزازية.

د-الضوء المرئي Visible Light:

هو إشعاع مرئي في الأطوال الموجية من 4000 إلى 8000 أنجستروم ،وفي المعنى المجازي تعتبر الموجات الكهرومغناطيسية الأطول والأقصر من تلك القيم كذلك ضوء ، وإن كانت هاتين المنطقتين غير مرئيتين. والعين البشرية لا ترى كل هذا النطاق ولكنها ترى في حدود 3800 إلى 7600 أنجستروم وتسمى هذه الأطوال الموجية بالأشعة المرئية. وتبلغ حساسية العين أكبر قيمة لها عند 5500 أنجستروم الذي يناظر لون الطيف الأصفر. وتكون طاقة هذه المنطقة كبيرة ($35\text{-}70\ \text{cal mol}^{-1}$) بحيث يمكن للإلكترونات الخارجية لبعض الجزيئات أن تتهيج إلى مستويات الطاقة العليا ويحتمل أن تحصل تغيرات كيميائية.

هـ- الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet:

هي منطقة من الطيف تتصل بالجزء البنفسجي قصير الموجة من الطيف البصري. والإشعاع فوق البنفسجي غير مرئي وموجاته أقصر من حوالي 4000 أنجستروم وتمتد حتى حوالي 100 أنجستروم. وتكون طاقة الفوتون الكمية في هذه المنطقة كبيرة ، بحيث يمكن للإلكترونات الخارجية للجزيئات أن تتهيج إلى مستويات الطاقة الأعلى وفي بعض الأحيان يحصل تأيناً. ويمكن الكشف عنها بالتصوير الفوتوغرافي أو بالفوتومترات.

هي أشعة كهرومغناطيسية مثل الضوء ، إلا أن موجاتها أقصر منه بكثير ، وهذه الأشعة غير مرئية وأطوال موجاتها محصورة بين 100 و 0.01 أنجستروم. وتكون الطاقة في هذه المنطقة عالية جداً بحدود آلاف أو ملايين الكيلو سعرات Kcal لكل مول mol ، وهذه الطاقة تعتبر كافية لإزالة الإلكترونات الأقرب إلى النواة.

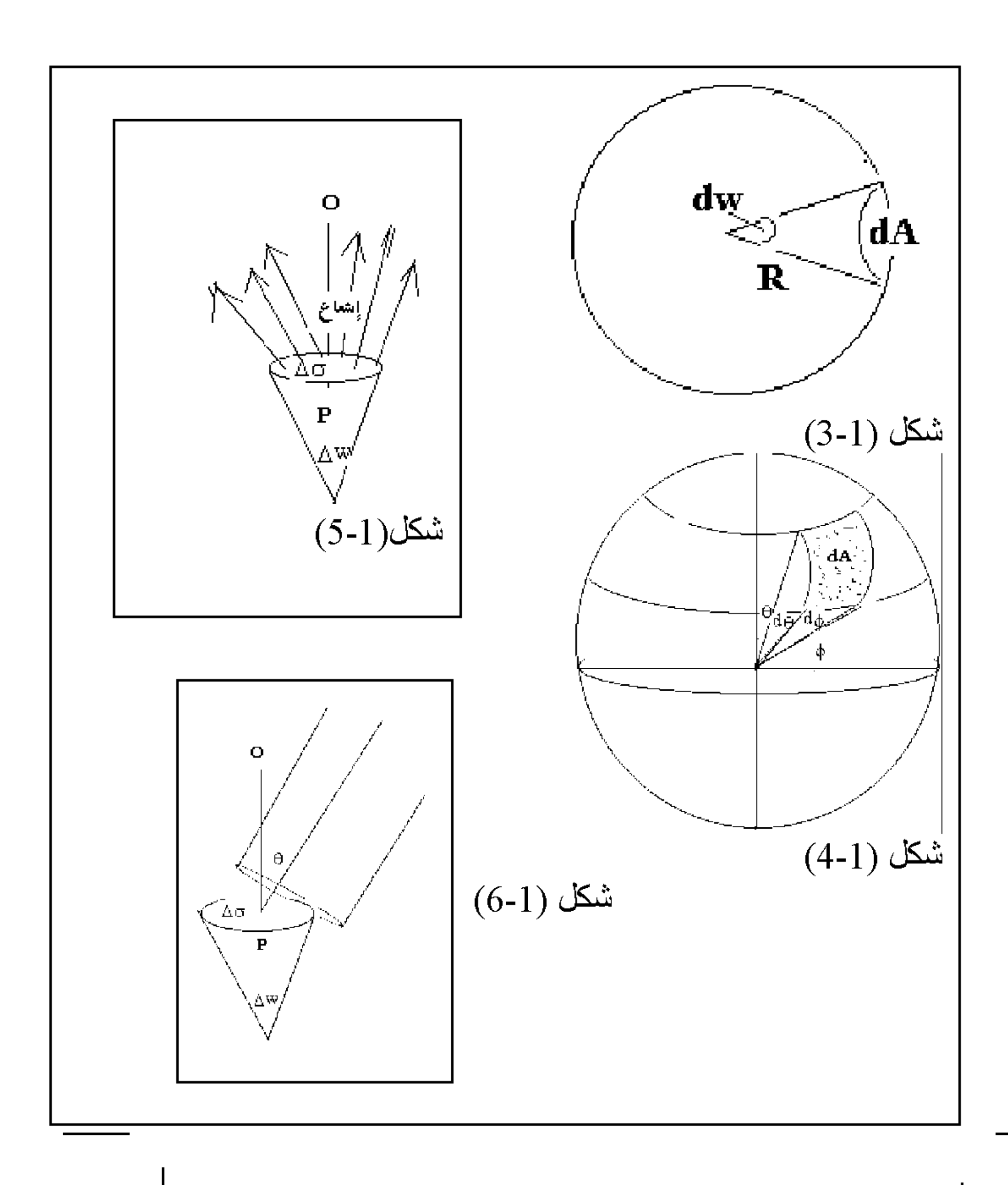
ز- أشعة جاما Gama rays :

هي أشعة قصيرة الموجة جداً ، حيث يقل طولها الموجي عن 0.01 أنجستروم. وفي هذه المنطقة يدرس أطياف انتقالات الطاقة بين مستويات بعض النوى. وتتميز إنبعاثات أشعة جاما بأنها حادة جداً.

وكلاً من الأشعة السينية وأشعة جاما تسمى أشعة رونتجن Roentgen. ونظراً لأن الغلاف الجوي الأرضي غير منفذ للموجات الأقصر من 3000 أنجستروم تقريبا، فأن أشعة رونتجن يمكن رصدها بواسطة البالونات والصواريخ والأقمار الصناعية وسفن الفضاء.

وعندما تزيد درجة حرارة الأجسام على سطح الأرض عن الصفر المطلق ، والذي يساوي سالب 273 درجة مئوية ،تُصدر تلك الأجسام إشعاعات كهرومغناطيسية بشكل مستمر ، وبكميات تتعلق بدرجة حرارة الجسم وخواصه التركيبية . وقد اتضح أن إشعاع جسم ما يزيد كلما ازدادت قدرته على الامتصاص ، ويحدث اتزان حراري thermal equilibrium بين تلك الأجسام والوسط المحيط بها عندما تتساوى كمية الحرارة الممتصة في الوسط المحيط مع كمية الإشعاع المنبعث من الجسم للوسط.

ومن تلك الملاحظات استطاع العلماء وضع قوانين فيزيائية تصف الإشعاع المنبعث والممتص بواسطة الأجسام. وقبل أن نتكلم عن قوانين الإشعاع سوف نذكر خواص الإشعاع



شكل (1-3)

شكل (1-4)

شكل(1-5)

شكل (1-6)

3-1 خواص الإشعاع

عرفنا سابقاً أن الإشعاع لا يخرج في اتجاه معين بل ينتشر في جميع الاتجاهات ، وهذا يؤدي إلى دراسة الزاوية المجسمة solid angle قبل دراسة خواص الإشعاع.

الزاوية المجسمة: هي الزاوية المركزية dw التي تقابل الجزء المساحي dA على سطح دائرة نصف قطرها R كما في شكل (1-3). ومن هندسة هذا الشكل نجد أن :

$$dw = dA/R^2 \qquad (1\text{-}4)$$

وفي الإحداثيات الأفقية – الرأسية dA=dx*dy ، أما في الإحداثيات الكروية فإن

$$dA=R^2\sin(\theta)d\phi d\theta \qquad (1\text{-}5)$$

وهذا لأن المساحة dA كما يتضح من الشكل (1-4) لها ضلعان : الأول على الدائرة العظمى الرئيسية والضلع الآخر على الدائرة الصغرى. الضلع الأول يصنع الزاوية θ مع الرأسي. والزاوية المحصورة بين هذا الضلع والضلع الواصل إلى ملتقى الضلعين تسمى dθ. وعلى هذا فطول الضلع الرأسي هو Rdθ. والضلع الآخر يصنع زاوية قدرها ϕ مع الأفقي ، وقيمته بدلالة البعد R هو Rsin(θ) ، وبذلك يصبح طول هذا الضلع Rsin(θ)dϕ. ومن المعادلة (1–4) و (1-5) تصبح الزاوية المجسمة $dw = \sin(\theta)d\phi d\theta$

وللإشعاع عدة خواص هامة في الفلك وهي :

1-الاتجاه : بفرض معرفة الطول الموجي ومدى التردد لمصدر ضوئي ما ، وعند النظر إلى هذا المصدر من بعد معين ، لابد من الأخذ في الاعتبار الاتجاه. ذلك لأن كثيراً من الأوساط التي يمر بها الضوء لا تكون متماثلة. ولمعرفة الاتجاه لابد قياس الضوء من اتجاه محددة reference frame . ولبيان أهمية الاتجاه ، نفرض أن مصدر ضوئي P ذات مساحة Δσ ومدى تردد Δν في زمن قدرة Δt ، عمودي على اتجاه الراصد O كما في شكل (1-5). وأن هذه المساحة تصنع زاوية مجسمة مقدارها Δw.

فتكون كمية الطاقة الإشعاعية الخارجة من هذا المصدر هي

$$\Delta E = I\ \Delta t\ \Delta w\ \Delta \nu\ \Delta \sigma \qquad (1\text{-}6)$$

وفي حالة أن المصدر يميل على الاتجاه OP بزاوية قدرها θ كما في شكل (1-6) فإن

$$\Delta E = I\ \Delta t\ \Delta w\ \Delta \nu\ \Delta \sigma \cos(\theta) \qquad (1\text{-}7)$$

من المعادلة (1-4) و (1-5) نجد أن كمية الطاقة الإشعاعية تعتمد على مجموعة من العوامل وهي Δw و θ . بالنسبة إلى θ نجد أن كمية الطاقة الإشعاعية تكون أكبر ما يمكن في الاتجاه العمودي. أما بالنسبة لـ Δw فإنها لا تؤثر فيه حتى لو آلت إلى الصفر ، لأن الإشعاع لا يحدث له تفرق أو انتشار على مساحات أوسع ، وبالتالي لا تقل شدته. وبهذا تصبح ΔE غير معتمدة على المسافة وهذه حقيقة هامة جداً ، ومنها فإن لمعان الشمس مثلاً إذا نظرنا إليها من زحل يكون هو نفس لمعانها لو نظرنا إليها من الأرض.

2- شدة الإشعاع : عند النظر إلى مصدرين للإشعاع على نفس المسافة والاتجاه من الراصد نستطيع أن نميز أيهما أكثر لمعاناً من الآخر عند تساوي سطحيهما. في الشكل (1-7) النقطة p يصلها إشعاعات في المدى الترددي $\Delta \nu$ من مصادر شتى داخل الزاوية المجسمة Δw ، وهذا يقودنا إلى التحدث عن الشدة المتوسطة ضرورياً. وقبل حساب الشدة المتوسطة يجب إيجاد الشدة الكلية للأشعة الصادرة إلى النقطة p من داخل المدى الزاوي Δw ، والتي تعطى من المعادلة (1-4) و (1-5) كالأتي

$$I_\nu = \lim_{\Delta\nu,\Delta\varsigma,\Delta w,\Delta t\to 0}\left\{\Delta E_\nu / (\Delta\nu\Delta\sigma\Delta w\Delta t)\right\} = d(E_\nu)/d(t)d(w)d(\nu)d(\sigma) \qquad (1\text{-}8)$$

أو

$$I_\nu = \lim_{\Delta\nu,\Delta\varsigma,\Delta w,\Delta t\to 0} \Delta E_\nu / (\Delta\nu\Delta\sigma\Delta w\Delta t \cos(\theta)) = d(E_\nu)/\{d(t)d(w)d(\nu)d(\sigma)\cos(\theta)\} \qquad (1\text{-}9)$$

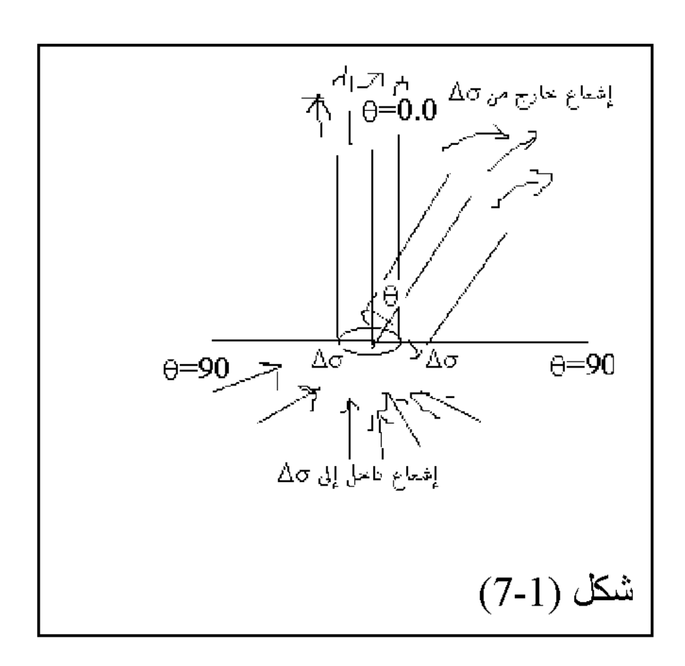
ومن المعادلة (1-6) و (1-7) وبالتكامل على سطح كرة نجد أن تحسب الشدة المتوسطة J_ν

$$J_\nu = 1/(4\pi) \int_{sphere} I_\nu(x, \theta) d\, w \qquad (1\text{-}10)$$

وهذا يعني أنه إذا اجتمعت الأشعة على العنصر المساحي من اتجاهات شتى دخولاً وخروجاً أصبح للزاوية المجسمة □Δ أهمية من نوع معين تؤدي بنا إلى ما يعرف بالفيض □.

بفرض أن الاتجاه المحدد للقياس هو الاتجاه العمودي كما هو موضح بالشكل (1-7) ، وهو الذي يتم منه قياس زوايا ميل الإشعاع. فعندما يميل العنصر المساحي $\Delta\sigma$ على الاتجاه العمودي تصبح مساحته $\Delta\sigma\cos(\theta)$ ، وبالتالي يعرف الفيض flux على أنه هو كمية الإشعاع في المدى الترددي $\Delta\nu$ التي تعبر العنصر المساحي $\Delta\sigma$ من الداخل إلى الخارج أو العكس. أي إذا كان الإشعاع صادر من مركز النجم إلى الخارج عابراً العنصر المساحي $\Delta\sigma$ فإنه محدد بالزوايا $90\rightarrow0\leftarrow90$ يميناً ويساراً من الاتجاه الأساسي.

ويحسب الفيض عند النقطة P في الشكل (1-5) كما يلي :



شكل (1-7)

$$\Delta F_\nu = \Delta E_\nu/(\Delta\nu\Delta\sigma\Delta t) \qquad (1-11)$$

ومن المعادلة 6 في المعادلة 8 نجد أن

$$\Delta F_v = I_v \cos(\theta)\, \Delta w \qquad (1\text{-}10)$$

بتكامل المعادلة (1-11) نجد أن كل الإشعاع الذي يعبر العنصر المساحي $\Delta\sigma$ إلى الخارج محصور بين $\theta=0$ و $\theta=90$ ويعطى بـ

$$F_v^{+}(x) = \int_{outward} I_v \cos(\theta)\, dw \qquad (1\text{-}13)$$

بينما الإشعاع العابر للعنصر المساحي $\Delta\sigma$ من الخارج إلى الداخل يعطى بـ

$$F_v^{-}(x) = \int_{inward} I_v \cos(\theta)\, dw \qquad (1\text{-}14)$$

ومن المعادلة (1-13) و المعادلة (1-14) يكون الفيض الكلي net flux هو

$$F_v(net) = F_v^{+}(x) - F_v^{-}(x) = \int I_v \cos(\theta)\, dw \qquad (1\text{-}15)$$

من هذه المعادلة نجد أن الفيض يعتمد على المسافة حيث قيمة الزاوية المجسمة dw تنقص كلما زادت المسافة بين الراصد والمصدر الضوئي. وأيضاً إذا كان الإشعاع متناظر isotropic فإن الفيض الكلي يساوي صفر.

3- الاستقطاب : في الظروف الطبيعية تكون اهتزازات الأمواج الضوئية متعامدة على اتجاه الحركة أو الانتشار ، وشدة الموجة تتناسب مع سعتها ، وكمية طاقتها تتناسب مع مربع السعة. إذا أستمر اتجاه التذبذب ثابتاً بالنسبة لاتجاه الحركة على طول الانتشار فإن الشعاع يطلق علية صفة الاستقطاب في مستوى . وإذا دارت المركبة الكهربية للشعاع في الفضاء بشكل لولبي بالنسبة لاتجاه الانتشار فأن الشعاع يطلق علية صفة الاستقطاب الدائري.
وعندما يسقط الضوء على وسط يتكون من غازات وجزيئات ، فإن إلكترونات الجزيئات أو الذرات في ذلك الوسط تمتص الضوء ثم تشع جزءاً منه. إن امتصاص وإشعاع الضوء من قبل الوسط يسمى تشتت أو استطارة ، وهذا هو الذي يجعل ضوء الشمس الواصل من أعلى إلى المشاهد على سطح الأرض مستقطباً جزئياً.

4-امتصاص وانبعاث الإشعاع :بفرض طبقة من المادة سمكها dx وشدة الإشعاع الساقط عليها مقدارها I_v^{o} ولقد وجد أن كمية الطاقة الممتصة بواسطة تلك المادة تقدر بـ

$$I_v = I_v^{o} \exp\{-\int d\tau\} \qquad (1\text{-}16)$$

حيث τ تسمى العمق الضوئي optical depth ، و تعتمد على كثافة المادة ρ وكذلك سمكها و معامل الامتصاص k_v لكتلة تلك المادة ، و تساوي

$$\tau_v = \int k_v \rho \, dx \quad (1\text{-}17)$$

وفي حالة انبعاث الإشعاع من تلك المادة فإن كمية الطاقة المنبعثة تساوي

$$F_v = 4\pi j_v \, dv \, dm \, dt \, dw \quad (1\text{-}18)$$

حيث j_v معامل انبعاث الإشعاع لتلك المادة.

وتكون كمية الطاقة المنبعثة بالنسبة لوحدة الزاوية المجسمة هي

$$F_v / dw = 4\pi j_v \, dv \, dm \, dt \quad (1\text{-}19)$$

1- 4 تأثيرات الغلاف الجوي الأرضي

تمر الأشعة الكهرومغناطيسية خلال الغلاف الجوي عبر مسافات يطلق عليها المسار في الجو. وتتأثر جميع الأرصاد الفلكية بالغلاف الجوي ، فيتغير الضوء الواصل إلينا من الأجرام السماوية في شدته وتركيبه الطيفي بواسطة الانكسار والاستبعاد والتألق ، أثناء سيره في جو الأرض.

تختلف نفاذية الغلاف الجوي باختلاف طول الموجة. والأشعة ذات الطول الموجي الأقصر من 3000 أنجستروم يتم امتصاصها بواسطة جزئ الأوكسجين O_2 وغاز الأوزون O_3 .فإذا ما أردنا رصد الأجرام السماوية في هذه الموجات فإن ذلك يستلزم الارتفاع لأكثر من مائة كيلومتر عن سطح الأرض. والغلاف الجوي منفذ للموجات في الحيز من 3000 إلى 10000 أنجستروم. وهذا النطاق الطيفي الذي يضم المنطقة القريبة من فوق البنفسجي والطيف البصري وتحت الأحمر ، ويسمى بالنافذة البصرية. ويعتبر الغلاف الجوي منفذاً بالنسبة للإشعاع ذي الموجات الطويلة من بضع مليمترات إلى عشرين متر. وفي هذا الحيز يتم أخذ الأرصاد الراديوية ، ويسمى لذلك بالنافذة الراديوية. أما الموجات الأطول من ذلك فتنعكس على الطبقة المتأينة من طبقة الأيونوسفير ، التي تمتد من 80 كم إلى 500 كم في الارتفاع من سطح الأرض ، وهي لذلك لا تصل إلى سطح الأرض.

يؤثر أيضاً الغلاف الجوي في شدة وتركيب الطيف الكهرومغناطيسي للإشعاعات المختلفة ، ويظهر هذا التأثير من خلال ميكانيكية التشتت أو التناثر scattering.

والتشتت : هو تناثر للإشعاعات لا يمكن توقعه ، يحدث بفعل الجزيئات الموجودة في الجو ، ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من التشتت :

تشتت ريلاي : هذا النوع من التشتت Rayleigh scattering هو الأكثر حدوثاً ، ويحصل هذا عندما تصطدم الإشعاعات مع جزيئات الجو والجزيئات الصغيرة ذات الأقطار الأصغر من أطوال موجات الأشعة المتداخلة ، ويلاحظ أن الأشعة ذات الطول الموجي القصير تتشتت بصورة أكبر من الأشعة ذات الطول الموجي الطويل بهذه الآلية ، وأوضح دليل على ذلك لون السماء الأزرق الناتج من تداخل أشعة الشمس مع جزيئات الجو وتشتت الأشعة الزرقاء الأقل طولا ، بينما يصبح لون السماء مائلا إلى الأحمر أو البرتقالي عند الغروب والشروق إذ تنتقل حينها أشعة الشمس ضمن مسار أطول فيحدث تشتت للأشعة ذات الأمواج القصيرة بشكل كامل ويظهر لون الأمواج الأطول الأقل تشتتاً. ويعتبر هذا النوع من التشتت

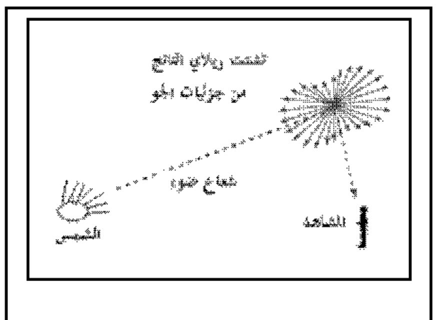
ولقد وجد ريلاي أن شدة الأشعة بعد التشتت تعطى بـ

$$I=I_o\ \{\ 8N\pi^4\alpha^2/R^2\lambda^4\}(1-Cos^2\theta) \qquad (1-19)$$

حيث N عدد الجزيئات المسببة للتشتت و α معامل الاستقطاب و λ الطول الموجي الساقط و R المسافة بين المشاهد وطبقات الجو و θ الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المستقطب (اتجاه المشاهد). ومن هذه المعادلة نجد أن شدة الأشعة المتشتته تعتمد على الأس الرابع للطول الموجي الساقط

- تشتت مي : يحدث هذا النوع من التشتت Mie scattering عندما تكون أقطار الجزيئات الجوية مساوية لأطوال موجات الأشعة التي تصطدم بها. ومن الأسباب الرئيسية لهذا التشتت جزيئات الغبار وبخار الماء H_2O العالقة في الجو. ويؤثر هذا التشتت في الموجات الطويلة.

-التشتت غير الانتقائي: يحدث هذا النوع nonselective scattering عندما تكون أقطار الجزيئات المسببة للتشتت أكبر بكثير من أطوال موجات الأشعة الكهرومغناطيسية. والمثال على ذلك التشتت الناتج بفعل قطرات الماء التي يتراوح قطرها بين خمسة إلى مائة ميكرومتر ، والتي تشتت كل الأمواج المرئية وتحت الحمراء بشكل متساوٍ تقريبا. وهذا يعني أن هذا التشتت ليس انتقائيا حسب طول الموجة.



5-1 القوانين الفيزيائية الخاصة بالإشعاع

ذكرنا سابقاً أن طيف كل جسم يعتمد على تركيبه الكيميائي ، لذلك عرف العلماء ما يسمى بالجسم الأسود black body المثالي ، الذي يمتص تماما كل ما يسقط عليه من إشعاع ويبعث بإشعاع أكثر من أي جسم آخر على نفس درجة حرارته (أي يطلقها ثانية بالكامل). وبذلك استطاع العلماء وضع قوانين تصف الحالة المثالية للإشعاع.

القانون الأول

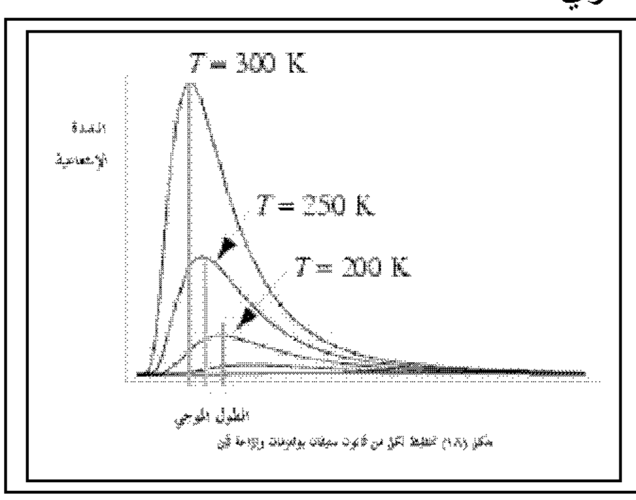
قانون ستيفان بولتزمان Boltzman Stephan Law الذي يعطي

1- العلاقة بين الطاقة (أو الإشعاع) التي تنبعث 1سم^2 من سطح النجم والأس الرابع لدرجة الحرارة المطلقة T^4.

$$W=\sigma T^4 \qquad (1-20)$$

حيث σ هي ثابت ستيفان - بولتزمان ويساوي

$1.2x10^{-9}$ $rg/cm^2.sec.deg^4$



2- الطاقة الحقيقية (الكلية) للإشعاع (أي مجموع طاقة الإشعاع في كل طيف) التي تنطلق من كل سطح النجم وتسمى الضياء أو النورانية أو اللمعان الحقيقي ، تساوي

$$L=4\pi\sigma R^2T^4 \qquad (1\text{-}20a)$$

حيث R نصف قطر سطح النجم.

ويوضح شكل (1-8) تخطيطاً للقانون ، لعدد من الأجسام السوداء المثالية في تصرفها الإشعاعي في درجات حرارة مختلفة. فكلما ازدادت درجة حرارة الجسم المشع زادت كمية الطاقة المنطلقة منه. ويلاحظ أن المنحنيات تبدي انحرافا باتجاه أطوال الموجات القصيرة ، إذ يتعلق طول الموجة للجسم المشع عند الذروة بالتحديد بدرجة الحرارة ، والذي يعبر عنة القانون الثاني.

القانون الثاني

قانون إزاحة فين Wien's displacement والذي يعطي العلاقة بين طول الموجة عند درجة إشعاع طيفي قصوى wave length at maximum spectral radiation ودرجة الحرارة المطلقة.

$$\lambda_m = A / T \qquad (1\text{-}21)$$

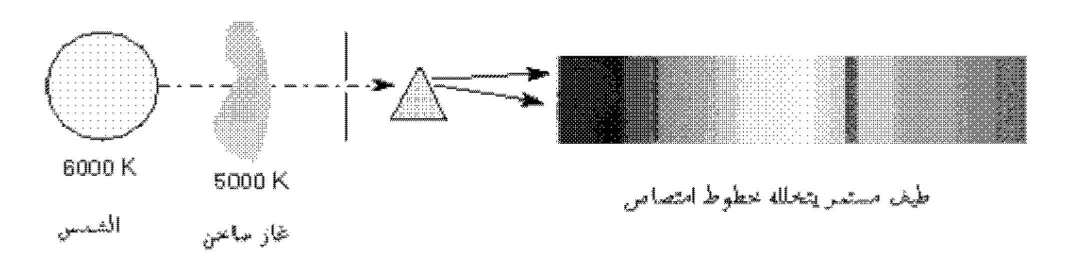
حيث A ثابت يساوي 2898 ميكرو متر. وبهذا يتبين أن طول الموجة الذي يحدث أقصى كمية من الإشعاع الطيفي للموجات الكهرومغناطيسية يختلف من جسم إلى آخر حسب التركيب الكيميائي للجسم.

وحيث أن الشمس والنجوم تعتبر أجساماً سوداء مثالية لأنها تشع موجات في مختلف الأطوال ، فمن القانون الأول والثاني بعد رصد كمية الإشعاع الصادر من النجوم وبعد تصحيحه نتيجة لما يفقده من طاقة خلال مساره في الغلاف الجوي يمكن معرفة درجة الحرارة الفعالة لسطح النجم ولون الشعاع المميز للنجم وبالتالي تركيبه الكيميائي.

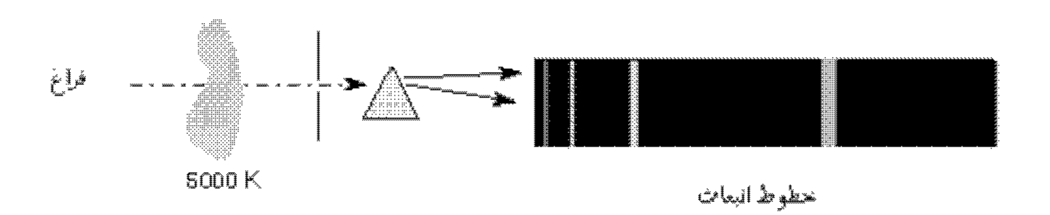
القانون الثالث

قانون كيرشوف Kirchoff ، الذي يعطي العلاقة بين طيف المواد و الخواص الفيزيائية لتلك المواد من ناحية درجات الحرارة والكثافة كما في شكل (1-9). ولقد توصل كيرشوف إلى ثلاثة قوانين تصف طيف المواد :

- طيف الأجسام الصلبة أو السوائل أو الغازات ذات الكثافة العالية ، حينما نرفع درجة حرارتها، يتكون من طيف مستمر لامع bright continuous spectrum.
- طيف الغازات المخلخلة حينما نرفع درجات حرارتها يتكون من خطوط طيفية إنبعاثية emission spectral line
- إذا جئنا بغاز مخلخل ووضعناه أمام مادة صلبة أو سائلة أو غازية ذات كثافة عالية ، وكانت درجة حرارة الغاز أقل من درجة حرارة تلك المادة ، فإن الطيف الناتج يتكون من الطيف المستمر اللامع الناتج من تلك المادة ، بالإضافة إلى خطوط طيفية ماصة absorption spectral line والتي تماثل تماما خطوط الغاز المخلخل اللامعة التي تظهر لو وضعنا الغاز فقط أمام جهاز الطيف.



أنواع الأطياف الخطية معتمدة على درجة حرارة الغاز والوسط المحيط به



شكل (١ – ٩) تطبيق قانون كيرشوف على الشمس

تفسر قوانين كيرشوف الثلاثة كل أطياف الأجرام السماوية ، حيث تطلق الشمس وبقية النجوم إشعاعاً مستمراً يعزى إلى غاز تحت ضغط عالي ودرجة حرارة مرتفعة (

القانون الرابع

تشكك بلانك في قانون تساوي توزيع الطاقة E=kT وعدم ارتباطه بالتردد ، ومن ثمَ فقد افترض أن قانون تساوي توزيع الطاقة الحرارية بين الذبذبات الموجية equipartation of thermal energy لا لزوم له في حالة إشعاع الجسم الأسود. بمعنى أن الطاقة لابد وأن تكون مرتبطة بالتردد. وحيث أن العلاقة E=kT تفترض أنه عند الوصول إلى الاتزان الحراري فإن T تصل إلى قيمة معينة ومنها فإن الطاقة لابد وأن تكون مستمرة كدالة في التردد. ولكن افترض بلانك أن الطاقة E دالة غير متصلة بل كمية ، بمعنى أنها تُمتص أو تنبعث في شكل قيم. ومت ثمَ وضع قانون الطاقة الجديد $E=nh_v$ ، حيث n عدد صحيح و h ثابت بلانك. وقد وجد بلانك أنه يمكن التعبير عن الطاقة على الشكل

$$E_v = hv / \{ \exp(hv/kT) - 1\} \qquad (1\text{-}22)$$

ومن ثمَ أمكن لبلانك حساب عدد الفوتونات N التي تنبعث من أي جسم ساخن في طول موجي (أو تردد معين) معين بمعرفة القدرة power المتوسطة المتولدة من ذلك الجسم ، عن طريق

$$N= P/E_v \qquad (1\text{-}23)$$

حيث E_v طاقة الجسم عند التردد المعين.

القانون الخامس

ظاهرة دوبلر :يتأثر الطول الموجي لخط الطيف المرصود بالحركة النسبية بين النجم والمشاهد، طبقاً للعلاقة الآتية $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_o$ ، حيث λ_o هي الطول الموجي لخط الطيف للجسم الثابت أو المقاس في المعمل و λ هي الطول الموجي المرصود لخط الطيف عندما يتحرك الجسم. وتكون مقدار الإزاحة بين الطوليين الموجيين هي $\Delta\lambda$. فإذا كان النجم مقترب من

$V = c[\Delta\lambda/ \lambda_o]$ (1-24)

مثال 1- أعلى شدة للموجات لضوئية الصادرة من الشمس هي للون الأصفر-البرتقالي ذو الطول الموجي 500 nm ، أحسب درجة حرارة الشمس.

الحل

$\lambda_m = 0.2898x10^{-2} / T$

$T=0.\ 2898x10^{-2} / 500x10^{-9} = 5796\ K$

مثال 2- إذا كانت كمية الطاقة التي تسقط عمودياً على مساحة 1سم^2 في الثانية خارج جو الأرض تساوي 1.37 مليون إرج/ث.سم^2 . ما هو ضياء الشمس.

الحل

ضياء الشمس $L= 4\pi\sigma R^2T^4 = (1.37x10^6\ )x(4x3.14x(150x10^{11})^2) = 3.8x10^{33}$ erg/sec

حيث R تساوي الوحدة الفلكية بالسنتيمتر

مثال 3- من معرفة قيمة الثابت الشمسي ، أحسب قيمة الطاقة الكلية المنبعثة من سطح الشمس في الثانية الواحدة. إذا كان نصف قطر الشمس يساوي 690 ألف كم. ثم أحسب درجة حرارة سطح الشمس

الحل

$L= 4\pi\sigma R^2T^4 = (1.37x10^6\ )x(4x3.14x(690x10^8)^2) =\ 8.2x10^{28}$ erg/sec

$T=[W/\sigma]^{1\backslash 4} = [1.37x10^6\ /1.2x10^{-9}]^{1/4} = 5812.8\ K$

مثال 4- متوسط القدرة المتولدة من الشمس يساوي تقريباً $3.9756x10^{26}$ وات. إذا كان متوسط طول الموجات للإشعاعات المنبعثة من الشمس هو 500 نانو متر. فكم عدد الفوتونات المنبعثة من الشمس في الثانية الواحدة.

الحل

$E_\nu = h\nu = hc/\lambda = (6.626x10^{-34}\ )(3x10^8)/ 500x10^{-9} = 3.9756x10^{-19}$ جول

$N = P/E_v = 3.9756x10^{26} / 3.9756x10^{-19} = 10^{45}$

5-1 عرض وشدة الخطوط الطيفية

إن امتصاص الطاقة من قِبل الجزيئات تسبب انتقال الجزئ من مستوى لآخر ، ونتيجة للانتقال نحصل على خط الطيف. ويتعين موقع الخط الطيفي بقياس طلاً من التردد أو الطول الموجي أو العدد الموجي. إضافة إلى ذلك هنالك خاصيتين مهمتين وهما عرض وشدة خطوط الطيفي.

1- عرض خطوط الطيف:

من الملاحظ أن الإمتصاصات أو الإنبعاثات الطيفية لا تكون بشكل بالغ الحد infinitely sharp lines ولكنها تقريباً تبدو بشكل حزم عريضة ، ويعزى السبب في ذلك إلى الفتحات الميكانيكية في أجهزة الطيف التي لا تكون ضيقة إلى أبعد الحدود ، وبذلك تسمح بمدى الترددات لتسقط على الكاشف بدلاً من تردد فردي مما يجعل الهيئة غير واضحة. وبالرغم من تطور الأجهزة وتحسن قوة الفصل إلا أن هناك عرضا طبيعياً أدنى لا يمكن لأي انتقال ذري أو جزيئي أن يتجاوزه مهما كانت قوة الفصل عالية. وينتج هذا العرض Spectral broadening من عدم إمكانية إيجاد مستويات الطاقة للأنظمة الذرية والجزيئية بدقة. وهناك عدة عوامل تشارك في هذه الخاصية.

- قاعدة اللادقة لهايزنبرج Heisenberg uncertainty principle:

إن مستويات الطاقة المكمّمة quantized ، حتى في الجزيئات المعزولة أو المستقرة ، ليست حادة جداً وذلك بفعل تطبيق القاعدة الأساسية للادقة لهايزنبرج ، والتي تنص على: أنه لو وُجد نظام في مستوى معين من مستويات الطاقة لزمن محدد مقداره □□ من الثواني فسيكون هناك لا دقة في طاقة النظام مقدارها □□ والعلاقة بين □□ و □□ تعطى بـ

$\square\square x\ \square\square \approx h \approx 10^{-34}$ (جول ثانية) (1-25)

ومن المعروف أن مستوى الطاقة المنخفض للنظام الذري يمكن أن يكون حاداً طالما أن النظام يبقى في ذلك المستوى لزمن لا نهاية له، لذلك فإن ∞□□□ و □□□. وبالنسبة للمستوى الإلكتروني المتهيج (المثار) فإن زمن العمر □□ هو بحدود 10^{-8} ثانية وقيمة □□ تساوي تقريباً □□1 جول. وعندما يحصل الانتقال بين هذا المستوى وبين المستوى

□ □. =□ □. /h = h/2□ h□ □. □.¯1□ □ □ □.¯1□ □.

فمثلاً مستوى اللف للإلكترون المتهيج له زمن عمر مقداره 10^{-7} ثانية والذي يقود إلى قيمة للتردد (من المعادلة 5-2) مقدارها 10^{7} هيرتز للانتقال. ولو قارنا هذه القيمة بالتردد الحقيقي للانتقال وهو $10^{9} - 10^{8}$ هيرتز لظهر لنا في الحقيقة انتقالاً عريضاً ، وهنا يظهر بوضوح تأثير مبدأ اللادقة.

- عرض التصادم Collision Broadening:

إن الذرات والجزيئات في كل من الطور الغازي تكون في حركة مستمرة وتعاني من تصادمات عديدة فيما بينها ، فلو كان زمن التصادم بين أي جزيئين X و Y طويلا مقارنة بمتوسط الزمن بين التصادمات فإن طاقة الامتصاص أو الانبعاث لتلك الجزيئات ستُشَوش على الجزئ X بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية على الجزئ Y. وهذا يؤدي على الأقل إلى تشوش perturbing طاقات الإلكترونات الخارجية. وهذا يعطي تفسيراً لعرض خطوط الطيف في منطقتي المرئي وفوق البنفسجية طالما أن هاتين المنطقتين تتعلقان بدراسة الانتقالات بين الإلكترونات الخارجية. كما أن الأطياف الاهتزازية والدورانية تكون عريضة كذلك بسبب تداخل التصادمات مع هذين النوعين من أنواع الحركة.

- ظاهرة دوبلر الحرارية Thermal Doppler effect :

إن حركة الجسيمات في الغازات تؤدي إلى ظهور تأثير دوبلر في ترددات الامتصاص والإنبعاث لها. وتعزى هذه الظاهرة إلى تغير سرعة الجزئ υ - التي تعتمد على درجة حرارة الغاز وكذلك مكوناته بالعلاقة $\upsilon = (2kT/m)^{1/2}$ - نسبة إلى سرعة القياس بالجهاز ، +υ و -υ مما يؤدي إلى تغير تردد الإشعاع الملاحظ للجزئ بإتجاهي القيمة الأعلى والأقل. ويعتمد هذا التغير للتردد على اتجاه حركة الجزئ. وبالنسبة لمجموعة من الجزيئات التي لها سرعات مختلفة نسبة إلى سرعة القياس بالجهاز فإن الخط الناتج سيكون عريضاً. ويكون هذا التأثير كبيراً في الجزيئات الخفيفة مثل H_2 عند 300 درجة مطلقة.

2-شدة خطوط الطيف :

إن أهم العوامل تحدد شدة خطوط الطيف هي : احتمالية الانتقال Transition probability ، وعدد الذرات والجزيئات في المستوى الذي يحصل منه الانتقال أو ما يسمى بتعداد الجزيئات population ، وكمية المادة التي سيقاس الطيف لها.

وفي الوسط الغازي تحدث عملية الإثارة للذرات excitation وكذلك العملية الأخرى المعاكسة لها وهي الرجوع لحالة الاستقرار de-excitation ، نتيجة لعمليات التصادم والإشعاع التي تحدث بين الغازات. وتلك العمليتان تعتمدان على درجة حرارة الوسط. ومتوسط طاقة حركة الغازات تعطى بـ $<m\upsilon^2/2>=3kT/2$ ، حيث m كتلة الغاز و T درجة الحرارة المطلقة و k ثابت بولتزمان ويساوي $1.38x10^{-23}J/K$ و υ السرعة. مع زيادة درجة الحرارة تزداد بسرعة عدد الفوتونات ذات طاقة معينة ، ولذلك خطوط الامتصاص التي تنشأ من عملية الاثارة لمستويات الطاقة تصبح أكثر شدة في الغاز الساخن منها في الغاز البارد. في حالة الاتزان الحراري فإن الذرات التي في حالة إيثاره تكون متوازنة مع الذرات التي ترجع إلى حالة الاستقرار وبالتالي فإن الكثافة العددية للذرات في مستوى الطاقة B وعلاقتها بالكثافة العددية بالذرات في مستوى الطاقة A ، حيث B>A ، لكل عنصر تعطى بعلاقة بولتزمان التالية

$$N_B / N_A = (g_A/g_B)\ \exp\{(E_A-E_B)/kT\} \qquad (1-27)$$

حيث N هي الكثافة العددية في مستوى الطاقة و g هي دالة الوزن الإحصائي و E طاقة مستوى الطاقة.

وعندما تزيد درجة الحرارة بدرجة كافية أكبر من درجة حرارة التصادم أو الإشعاع يحدث تأين للذرات. وعموماً يتكون الوسط الغازي الساخن من ذرات متعادلة و متأينة وإلكترونات حرة. ومع زيادة الكثافة العددية للإلكترونات N_e يؤدي هذا إلى احتمالية زيادة اتحاد الأيونات مع الإلكترونات للتحول إلى ذرات متعادلة. هاتان العمليتان التأين والاتحاد recombination $(X^+ + e \leftrightarrow X)$ تصلا إلى حالة الاتزان عندما يتحقق شرط حالة الاستقرار steady state ، وهو أن معدل معامل التأين يساوي معدل معامل الاتحاد. وتحسب عملية الاتزان هذه باستخدام معادلة سها Saha

$$N_i/N_0 = \{A(kT)^{3/2}/N_e\}\ \exp(-\chi_0/kT) \qquad (1-28)$$

حيث N_i هي الكثافة العددية للأيونات وN_0 هي الكثافة العددية للذرات المتعادلة في مستوى الاستقرار و A ثابت و χ_0 جهد التأين.

ويمكن تعميم هذه المعادلة لتعطي نسبة N_{i+1}/Ni لأي درجة تأين i+1 و الدرجة التي تقل عنه i

$$N_{i+1}/Ni = \{ A(kT)^{3/2}/N_e\} \exp(-\chi_i/kT) \qquad (1\text{-}29)$$

حيث χ_i جهد التأين للدرجة i .

6-1 معادلة الانتقال

واحدة من أهم المشكلات في الفيزياء الفلكية هي كيفية حساب كثافة الإشعاع بعد عبوره خلال سحابة من الغازات أو الغلاف الجوي للكواكب والنجوم . المعادلة التفاضلية التي تصف تلك العملية تسمى معادلة الانتقال وهي :

$$I_v = I_v(0) \exp[-(\tau_2 - \tau_1)/\mu] + \mu^{-1} \int_{\tau 1}^{\tau 2} s_v \exp[-(\tau_2 - \tau_1)/\mu]\, d\tau \qquad (1\text{-}30)$$

حيث I_v كثافة الإشعاع بعد مروره خلال مسافة قدرها dl و $I_v(0)$ كثافة الإشعاع الابتدائية و v التردد خلال المسار. و العمق الضوئي للإشعاع هو $\tau = \int x_v dl$ ، حيث x_v معامل انطفاء الضوء extinction خلال المسار. و $s_v = \eta_v / x_v$ هي دالة المصدر و η_v معامل الانبعاث emission (أي كمية الطاقة المضافة إلى مجال الإشعاع). في حالة الاتزان الحراري الهيدروديناميكي s_v تعطى بتوزيع بلانك.

وحل المعادلة (1-30) في حالة انتقال الإشعاع خلال الغلاف النجمي ، حيث العمق الضوئي يصل إلى ما لا نهاية ، نجد أن $I_v = s_v$ (هذه العلاقة تسمى علاقة اينجتون-باربير). أما في حالة السدم الغازية نجد أن $I_v = s_v(1-e^{-\tau})$. في هذه الحالة τ هي العمق الضوئي الكلي ، وعندا يكون العمق الضوئي كبير جداً – أي $\tau >> 1$ نحد أن $I_v = s_v$. أما في حالة العق الضوئي الضعيف تكون $I_v = s_v \tau$.

الهوامش

1- Kitchin C.R. " **Optical Astronomical Spectroscopy** " 1995.Institute of physics publishing . Bristol and philadelphia

2- Karttunen H., Kroger P., Oia H., Poutanen M., Donner K.J. " **Fundamental Atronomy"** 1994. Springer-Verlag Berline Heidlberg. Germany.

3-

الباب الثاني

نشـأة الكـون The Cosmogony

مقدمة

يبين تمدد الكون وتباعد المجرات أنه في زمن مبكر من عمر الكون كانت المجرات أقرب إلى بعضها البعض ، وفي زمن بعيد جداً كانت المجرات أكثر قرباً من بعضها البعض مما هي عليه الآن. وهكذا وباستمرار حركتنا التخيلية المعاكسة عبر الزمن في مجرتنا درب التبانة ، تنعكس الحركات التباعدية للمجرات من حولنا بحيث تبدو كأنها تقترب من بعض أكثر فأكثر لتندمج أخيرا في كتلة واحدة كثيفة جداً ، ذات ضغط هائل ودرجات حرارة تصل إلى عدة بلايين من الدرجات المئوية .

ويعتبر الأب لاميتر Georges Lemaitre (في سنة 1927) وهو فلكي بلجيكي وجورج جامو G. Gamow في عام 1946 من أول من قالوا بهذه النظرية وتقول هذه النظرية إن المادة والطاقة كانت مجتمعة معاً بطريقة معينة انفجرت في لحظة من اللحظات ونتيجة لذلك الانفجار نشأت الذرات والمواد ثم المجرات والنجوم وأخيرا الحياة إلا أن مثل هذه النظرية لم تلق الضوء على كيفية تكون الكون بشكله الحالي ، خصوصا مجرة درب التبانة (اللبانة) المشهورة التي تحوي نظامنا الشمسي بكواكبه وأقماره المعروفة.

وقد أدى تطور المراصد الفلكية والأبحاث النظرية إلى معرفة تركيب الكون من الناحية الفيزيائية والكيميائية والحركية. ويعتقد غالبية العلماء الآن أن الكون تشكل في البدء نتيجة انفجار عظيم أو ما يعرف باسم Big-Bang وذلك من حوالي 14 بليون سنة تقريبا. وهذا الانفجار لم يكن انفجاراً كتلك الذي يمكن أن يحدث علي سطح الأرض ، وإنما هو انفجار حدث في كل مكان وفي آن واحد ، فملأ الفضاء كله منذ البدء ، وهرب كل جسيم عن كل ما عداه. وبدأ العلماء يلاحظون كافة المجرات وهي تتسارع مبتعدة عن الأنظار كما قاموا بمراقبة الطاقة المتخلفة عن الانفجار العظيم التي تغمر الفضاء في شكل إشعاعات منتظمة .

وقد أرسل القمر الصناعي المسمى مكتشف الأشعة الكونية الخلفية Cosmic background explorer (Cobe) معلومات عن كيفية الانتقال من الانتظام مباشرة بعد حدوث الانفجار العظيم إلى التوزيع العشوائي للمادة بصورة غير مرئية في الفضاء. وقد كشفت معلومات هذا القمر أن المادة في الكون

وفكرة الثقب الأسود كانت معلومة منذ أواخر القرن الثامن عشر الميلادي، حيث كانت إحدى الاستنتاجات المترتبة على نظرية نيوتن للجاذبية. وهذا الاستنتاج نص على أن الأشعة الضوئية لا تستطيع أن تنطلق من الجسم الكروي الذي يصدرها إذا كانت نسبة كتلته لنصف قطره أكبر من قدر معين ، وتسمى بالقيمة الحرجة لهذه النسبة. وبحساب هذه القيمة وجد أنها نصف مربع سرعة الضوء لثابت الجاذبية الكوني ، أي تساوي 6.75×10^{26} كجم/م. ومتى زادت نسبة الكتلة لنصف القطر عن تلك القيمة الحرجة أصبحت الأشعة الضوئية الصادرة عن الجسم أسيرة له. ويصبح الجسم ثقبا أسود موضوعا في السماء لا يرى ولا يعرف وجوده إلا بأثره على ما جاوره. أما نظرية النسبية العامة فلقد أوضحت أنه يمكن وجود الثقوب السوداء وتم ذلك على يد نشفارتز شيلد في عام 1915 بذات المفهوم الذي تأسس على نظرية نيوتن. وأصبح تعريف الجسم الأسود وفق تصور النسبية العامة كما يلي: هو موقع في السماء ، وليس جسما ماديا ، يحيط به مجال لقوة الجاذبية تبلغ شدته حدا لا يسمح بالتعايش السلمي مع أي شكل من أشكال المادة الكتليه.

ومن المؤكد أن نظرية الانفجار العظيم يمكنها تفسير عدد من الظواهر الكونية أكثر بكثير من النظريات المنافسة لها. إلا أنها ليست كاملة ولقد مهدت هذه النظرية ، لعلماء الفيزياء وتطبيقاته على علم الفلك في بداية القرن العشرين ، الحصول علي إنجازات كبيرة في معرفة طبيعة الكون الحالي.

ولقد شكلت نظرية الانفجار العظيم منعطفاً في علم الفلك وقد افترضت انتشار المواد في الأرجاء الواسعة للكون. فقد أعقب الانفجار انتشار للمادة بصورة غير منتظمة في أرجاء الكون .ولهذا افترضت النظرية ضرورة وجود نوع من عدم الانتظام لتفسير وجود المجرات والنجوم وتبعثرها بنسب متغيرة لتفسير نشوء الحياة على الأرض .وحسب النظرية فإن

ويستطيع العلماء الآن وصف اللحظات التي تلت الانفجار العظيم إلا انهم لا يمكنهم تصور شكل الكون قبل ثوان من الانفجار العظيم والقوة التي تسببت فيه وحتى اليوم لا يستطيع العلم الإجابة على سؤال يتعلق بكثافة الكون بعد الانهيار العظيم ولا توجد أي آفاق لمعرفة ذلك مستقبلا لأن قوانين الزمن والفضاء ينبغي إعادة صياغتها من جديد لعصر ما قبل الانفجار العظيم وما بعد الانهيار العظيم .

وقبل أن نتكلم علي تكوين الكون البدائي سوف نعطي فكرة مبسطة عن خصائص الجسيمات الأولية وأنواعها.

الجسيمات الأولية Elementary Particles

إن فكرة تكون المادة من مكونات أولية تعد قديمة. فقد اعتقد الرياضي اليوناني ديمقريطس أن المادة مكونة من ذرات Atoms . وهذه الكلمة تعني باليونانية غير قابلة للتجزئة. وفي نهاية القرن التاسع عشر (1897) توصل العالم البريطاني ج.ج طومسون إلى أن الكهرباء تحملها جسيمات دقيقة سالبة الشحنة تسمى إلكترونات ، أقل بكثير من كتلة الذرة. ثم استنتج بعد ذلك إرنست راذرفورد في عام 1911 أن الذرة تحتوي على شذرة صلبة دقيقة الحجم من المادة موجبة الشحنة هي النواة. وفي عام 1928 افترض دراك Dirac وجود البوزيترون Positron في حساباته الخاصة بميكانيكا الكم ، واكتشفه عمليا بعد ذلك أندرسون Anderson في عام 1932.

وترجع قصة اكتشاف البوزيترون إلي عام 1928 عندما قام بول ديراك بعمل بحث نظري ينصب على سلوك جسيم من الجسيمات التي تبني الذرة ، ويسمى بالإلكترون ، باستخدام نظرية الكم Quantum theory لماكس بلانك ونظرية النسبية. وبلغة المعادلات الرياضية تناول ديراك إلكترونا وحيدا ينطلق في الفراغ المطلق ، أي أنه ليس أسير ذرة يطوف

وبعدما اكتشفت الأشعة الكونية وفي عام 1932 عندما كان كارل أندرسون يتناول بالبحث مسألة الأشعة الكونية علّه يصل إلي حقيقتها. جذب انتباه أندرسون مسيرة جسمين ولدا وظهرا في نقطة واحدة على ألواحه الحساسة ، ولكن أحدهما اتجه يمنة ، واتجه الآخر يسرة ، وأن أثر المسيرة التي تركها كل جسيم تؤكد أنهما إلكترونان. ولكنة تحير وتساءل ما الذي جعلهما يبتعدان ويفترقان ويسلك كل منهما طريقا معاكسا للآخر ؟.

ولم يكن أندرسون وقتها قد اطلع على بحث ديراك. بعدها يجئ بلاكيت و أوكياليني ويربطان بين نظرية ديراك عن الإلكترون ونقيضه وبين ما وجده أندرسون ، ويشيران إلى أن أحد الجسمين الذي اتجه يمينا هو الإلكترون ، أما الذي يشبهه فهو الإلكترون النقيض الذي تنبأ به ديراك.

والغريب أن البوزيترون كان قد ظهر قبل أن يخرج ديراك بنظريته الجديدة ، وأنه ترك أثاره على الألواح الحساسة العائدة من طبقات الجو العليا عندما كانت تستخدم البلونات في عملية الرصد. ولكن العلماء الذين فحصوها قبل عام 1928 لم يعرفوا وقتها غير الإلكترونات والبروتونات.

وقبل اكتشاف البوزيترون عمليا نجح رزرفورد في عام 1919 في تكسير نواة النيتروجين بضربها بجسيمات ألفا وأوضح أن جسيماً جديداً قد انطلق وهو البروتون. أما مضاد البروتون فقد تم اكتشافه عام 1955 على يد سيجر Segre وآخرين. ومشكلة انحلال أشعة بيتا قد حلت جزئيا بواسطة فيرمي

وبتطوير المعجلات التي تحطم الجسيمات بطاقات عالية تم اكتشاف عشرات من الجسيمات الجديدة. وقد قسمت هذه الجسيمات إلى نوعين هما: الهادرونات واللبتونات. فالهادرونات Hadrons كلمة مأخوذة من اليونانية ومعناها ثقيل أو أقرباء البروتون والنيوترون. وجميع تلك الجسيمات قابلة للتفكك والانحلال بدرجات متفاوتة في فترة زمنية قصيرة. وعموما فالهادرونات هي التكوينات المشتركة من الكواركات.

و الكواركات Quark عبارة عن ستة أنواع تتشكل في ثلاثة أطوار Phases، أي في كل طور Phase نوعان فقط حسب الشحنة الكهربائية. فالطور الأول يشمل كوارك - قمة Top بشحنة الثلثين بالموجب بالنسبة لشحنة البروتون. وزميلة كوارك _ قاع Bottom بشحنة الثلث بالسالب. والطور الثاني يشمل كوارك _ فتنة Charm بشحنة الثلثين بالموجب وقريب للكوارك _ قمة وأثقل منه وزنا ، وزميلة كوارك _ غريب Strange بشحنة الثلث بالسالب وقريب للكوارك _ أسفل وأثقل منه وزنا. والطور الثالث يشمل كوارك _ أعلى up بشحنة الثلثين بالموجب وزميله كوارك _ أسفل Down بشحنة الثلث بالسالب. وكتلة كل كوارك 300 ألف إلكترون فولت. ولا توجد الكواركات منفردة أبدا. ويتكون البروتون الموجب من ثلاثة كواركات معا ، منها اثنان من نوع أعلى وواحد من كوارك أسفل ، ويكون مجموع الشحنة الكهربائية في النهاية واحد بالموجب هي شحنة البروتون. ويربط هذه الكواركات معا جسيمات أخرى حاملة للقوى النووية الشديدة تعرف باسم جلون Gluon . بينما يتكون النيترون من ثلاثة كواركات معا ، منها اثنان من نوع أسفل وواحد من نوع أعلى فيكون ناتج مجموع الشحنة الكهربائية صفر. ويمكن أن يتحد كوارك مع كوارك مضاد لتكوين نوع أخر من الجسيمات. فمثلا جسيم بايون Pion يتكون من كوارك أعلى وكوارك أسفل ويكون ناتج جمع الشحنتين واحدا بالموجب. أما عندما يتحد ثلاث كواركات معا ، اثنين من نوع أعلى وواحد من نوع فتنة يتكون جسيم غير مستقر يسمى هيبرون متعادل. و أما الاتحاد بين اثنين من نوع

أما جسيمات الليبتون الأولية Lepton فهي خفيفة وتكونت عقب الانفجار العظيم مباشرة، ويصعب أن تتفاعل مع غيرها من الجسيمات. وليبتون كلمة مأخوذة من اليونانية ومعناها الضوء والتي نطلق عليها في عصرنا الحالي الفوتون. وهذه الجسيمات تشمل ستة أنواع في ثلاثة عائلات حسب الشحنة. فالعائلة الأولى تتكون من الإلكترون وهو المسؤول عن الكهرباء والتفاعلات الكيميائية وله شحنة مقدارها سالب واحد. وهو يتكون من اتحاد ثلاثة جسيمات ليبتون ، وتربطها معا جسيمات أخرى حاملة للقوى النووية الضعيفة تعرف باسم بوزون Boson . أما زميله فهو نيوترينو الإلكترون ، وهو عديم الشحنة كهربائية وعديم الكتلة. والعائلة الثانية تتكون من الميون Muon وهو قريب للإلكترون وأثقل منه ويعيش لمدة اثنين من المليون من الثانية. وزميله فهو نيوترينو الميون وينتج مع الميونات عندما تدخل بعض الجسيمات. والعائلة الأخيرة تتكون من التاو Tau وهو أكثر ثقلا وغير مستقر ، أما زميله فهو نيوترينو التاو.

وفي النهاية يمكن القول أن من تلك الجسيمات الأولية تتكون الجسيمات الأساسية الخفيفة والثقيلة دون الذرية subatomic Particles، والتي تعرف باسم فيرميون Fermion مثل الإلكترون والبروتون والنيوترون. كما يتحول أحدها إلي الأخر باستمرار طالما وجدت في درجات حرارة مرتفعة.

ولتحديد درجة الحرارة المناسبة لتكوين كل جسيم نووي معروف الكتلة m علينا أن نقسم كمية الطاقة mC^2 – حيث C سرعة الضوء – على ثابت بولتزمان والذي مقداره 0.0008617 إلكترون فولت. ويصبح خارج القسمة هو درجة الحرارة المطلوبة. والجدول التالي يوضح خواص بعض الجسيمات النووية

الجسيم	الرمز	طاقة السكون بملايين إلكترون فولت	درجة حرارة العتبة بمليارات الدرجات المطلقة	مدة الحياة بالثواني

ليبتونات	فوتون	□	0	0	مستقر
	نيترينو	□	0	0	مستقر
	إلكترون	e^-, e^+	0,511	5.93	مستقر
	ميون	□□	105.66	1226.2	$2.197x10^{-6}$
هادرونات	باي-ميزون	□□	139.57	1619.7	$2.6x10^{-8}$
	بروتون	p^-, p	938.26	10888	مستقر
	نيوترون	n^-, n	939.55	10903	920

طاقة السكون **Annihilation** : هي الطاقة التي تتحرر عندما تتحول كتلة الجسيم كلها إلي طاقة
درجة حرارة العتبة **Threshold temperature** : هي ناتج قسمة طاقة السكون علي ثابت بولتزمان ، وفوق هذه الدرجة يمكن للجسيم أن يتولد تلقائيا من الإشعاع الحراري
مدة الحياة : هي متوسط الزمن الذي يتفكك الجسيم خلاله إشعاعيا إلي جسيمات أخرى

تكوين الكون البدائي
The Structure of the Early Universe
إن أكثر التحديات التي تواجه العلم وأكثرها إثارة هي فهم شكل بنية الكون. وتبدو محاولة فهم ما وقع من حوادث في اللحظات الأولى بعد

ولا تتأثر كل الجسيمات بالتفاعلات القوية ، فالذي يشعر بهذه القوى نوع واحد من الجسيمات يسمى هادرون Hadrons ، وهي أثقل بكثير من الليبتونات. وهذا النوع من الجسيمات يشتمل على جسيمات الكوارك Quark والباى ميزونات وجسيمات غير مستقرة تسمى هيبرون وسيجما هيبرون كما ذكرنا سابقا.

فعند هذه الدرجة من الحرارة كان الكون يتكون من فوتونات والتي هي عبارة عن أشعة جاما عالية الطاقة ، وليبتونات وليبتونات مضادة

<u>بعد واحد من مائة من الثانية</u> : كانت درجة حرارة الكون مائة ألف مليون درجة (10^{11} درجة مطلقة) وكان الكون عبارة عن حساء تختلط فيه الإشعاعات بالمادة ويتصادم الجميع بشدة في حالة اتزان حراري. هذه الحرارة الشديدة لا تتحملها جميع المواد المعروفة لدينا: مركباتها وجزيئاتها ، بل ذراتها وأنويتها. إنها حرارة تفتت أنوية الذرات إلي مكوناتها الأساسية التي نطلق عليها الجسيمات الأولية Elementary Particles .وفي هذه الظروف تسود الجسيمات ذات درجات حرارة العتبة الأقل من 10^{11} مطلقة ، و هي الإلكترونات والبوزيترونات والفوتونات والنيوترينو والنيوترينو المضاد ،وتتصرف كلها وكأنها إشعاعات. وكثافة الكون في هذه اللحظة عالية جدا (تبلغ 3.8 ألف مليون كيلو جرام في اللتر) حتى النيوترينو يضطر للدخول في اتزان حراري Thermal Equilibrium مع غيره من الجسيمات مما يؤدي إلى تصادمه المستمر مع الإلكترونات والبوزيترونات والفوتونات ومع نفسه أيضا، وهو الجسيم المعروف بخموله ويسير عدة أعوام في طبقة من الرصاص دون أن يتشتت.

ولمعرفة إمكانية وجود وانتشار عناصر كيميائية عند هذه اللحظة لابد من حساب عدد البروتونات إلي عدد النيترونات. فمن معلوماتنا عن الجسيمات النووية نعرف أن النيوترون أكبر كتلة من البروتون بما قيمته 1.283 مليون إلكترون فولت وأن الطاقة المصاحبة للإلكترون أو البوزيترون عند درجة حرارة 10^{11} درجة مطلقة هي عشرة مليون إلكترون فولت ، أي أكبر بكثير من الفرق بين البروتون والنيوترون. وهذا بدوره يؤدي إلي تصادم البروتونات أوالنيوترونات مع الإلكترونات أو البوزيترونات ليعطي تحول سريع من البروتون إلي النيترون والعكس طبقا للمعادلات الآتية :

نيوترينو مضاد + بروتون ---> بوزيترون + نيوترون

نيوترينو +نيوترون ----> إلكترون +بروتون.

من ذلك يمكن استنتاج أن احتمال تحول البروتون إلي نيترون مساو لاحتمال تحول النيترون إلي بروتون ، أي إن عدد

<u>بعد اثنين من عشرة من الثانية</u> : بلغت درجة حرارة الكون 30 ألف مليون درجة ، ولم يتغير الكون من الناحية الكيفية ومازال بنفس مكوناته السابقة في حالة اتزان حراري بينما بلغت الكثافة 30 مليون كيلو جرام في اللتر. والتغير الوحيد الذي حدث نتيجة لانخفاض درجة الحرارة هو أن تحول النيترونات إلي بروتونات أصبح أسهل من تحول البروتونات إلي نيترونات. وهذا أدى إلى إزاحة التوازن بينهما لصالح البروتونات ، حيث أصبحت النسبة 62 بروتون إلي 38 نيوترون.

<u>بعد ثانيتين</u> : بلغت درجة حرارة الكون 10 ألاف مليون درجة.والتغير الذي حدث عند هذه اللحظة هو ازدياد حرية النيوترينو والنيوترينو المضاد نتيجة لانخفاض الحرارة والكثافة ، حيث بلغت الكثافة 380 ألف كيلو جرام في اللتر. وذلك معناه أن النيوترينو والنيوترينو المضاد قد خرجا من عملية الاتزان الحراري مع الإلكترونات والبوزيترونات والفوتونات. ودرجة الحرارة عند هذه اللحظة مازالت أعلى مرتين من درجة العتبة للإلكترونات والبوزيترونات ، لذا فسوف تبدأ هذه الجسيمات في التلاشي بمعدل يزيد قليلا عن معدل تكوينها عندما تتصادم بالفوتونات. وأيضا مازالت درجة الحرارة أعلى من أن تسمح للبروتونات والنيترونات بالاتحاد لتكوين أنوية مستقرة ، بينما تصبح النسبة بين البروتونات إلى النيترونات 76 إلي 24 .

<u>بعد ستة عشر ثانيه تقريبا</u>: تبلغ درجة حرارة الكون هنا ثلاثة الاف مليون درجة. وهذه الدرجة تحت درجة العتبة للإلكترونات وبالتالي تتصادم الإلكترونات مع جسيمات أخرى لتتلاشى، ويقل عددها بصورة سريعة بعد أن كانت أحد المكونات الكبرى للكون. وعملية تلاشي الإلكترونات مع البوزيترونات تطلق طاقة مما يؤدي إلى نقص معدل انخفاض درجة حرارة الكون. وعندما تختفي الإلكترونات والبوزيترونات بهذه السرعة فإن كثافة الطاقة في الكون تقل. ودرجة الحرارة عند هذه

يتفاعل بروتون سريع مع نيوترون سريع لتكوين هيدروجين ثقيل(ديتريوم D).

^{1}H + نيترون → D + فوتون

ثم تتصادم نواة ديتريوم مع بروتون سريع آخر فنحصل على نظير الهليوم ^{3}He ،

$D + ^{1}H \rightarrow ^{3}He$ + فوتون + (طاقة قدرها 5.493 M ev)

أو مع نيوترون سريع فنحصل على نظير الهيدروجين ^{3}H (تريتيوم)

D + نيترون → ^{3}H + فوتون

وهاتان النواتان غير ثابتتين في تلك الحالة من درجات الحرارة العالية. حيث يتحلل الديتريوم بسرعة بينما يتحلل التريتيوم في مدة نصف عمر مقدارها 12.33 سنة إلي نظير الهليوم ^{3}He وإلكترون ونيوترينو :

$^{3}H \rightarrow ^{3}He + e$ + نيوترينو.

وتكوين هاتين النواتين يمثل عنق الزجاجة في تكوين نواة الهليوم-4 ^{4}He، وذلك إما بتصادم بروتون مع ^{3}He أو نيوترون مع نواة تريتيوم ^{3}H . ونواة الهليوم-4 تتحمل درجات حرارة عالية حتى إنها يمكن أن تتواجد بدءا من اثنين من عشرة من عمر الكون. لكن ذلك غير ممكن لأنه يكون في طريق تكوينها أنوية وسيطة غير ثابتة . ولمقارنة ثبات نواة الهليوم-4 بنواة الديتريوم الوسيطة يكفي أن نقول إن الطاقة اللازمة لفصل بروتون عن نيوترون في نواة الهليوم أكبر تسع مرات من الطاقة اللازمة للقيام بنفس العملية في نواة الديتريوم. لذلك فإنه في درجات الحرارة العالية هده لو تكونت نواة ديتريوم فإنها تتكسر مرة أخرى إلي بروتون ونيترون. ويستمر الكون في التمدد وحتى يصل إلي مائة ثانية من لحظة الانفجار فإن عملية تكوين البروتونات من اتحاد الكواركات لا تنعكس ، حيث يتحلل البروتون إلي نيوترون وبوزيترون ونيوتريونو بواسطة تصادمه مع

بعد ثلاث دقائق ونصف : تبلغ درجة حرارة الكون ألف مليون درجة. وفي هذه اللحظة تتلاشى الإلكترونات والبوزيترونات و لا يتبقى سوى الفوتونات
والنيوترينو والنيوترينو المضاد كمكونات أساسية للكون. وفي تلك الأثناء يصبح الكون باردا بحيث يمكن لنظير الهليوم ^3He والتريتيوم ^3H أن يتكونا بثبات كافٍ. ولكن مازال الديتريوم ^2D غير ثابت. وبعد فترة قصيرة جدا من تلك اللحظة انخفضت درجة الحرارة إلي الحد الذي أصبحت فيه ذرة الديتريوم ^2D ثابتة ومتماسكة ، وهذا يؤدى بدوره إلي تكون العناصر الثقيلة مثل الليثيوم بسرعة ، ولكن النويات الأثقل من الهليوم تتكون بعدد محدود.

بعد ساعة وربع : بلغت درجة حرارة الكون 300 مليون درجة وتلاشت كل الإلكترونات والبوزيترونات إلا عدد قليل منها ، وهو الذي يكفي لمعادلة شحنات البروتونات. وفي تلك اللحظة انتهت عملية تكوين النويات الثقيلة ولكن مازالت درجة الحرارة مرتفعة جدا وغير مناسبة لكي ترتبط الإلكترونات بالنويات لتكون ذرات ثابتة. يستمر الكون في التمدد والبرودة ، ولكن لن يحدث شيء ذو قيمة لمدة ثلاث مائة ألف سنة. بعد ذلك تكون درجة الحرارة قد انخفضت الانخفاض الكافي الذي يسمح بأن تتحرك الإلكترونات في رحاب بروتونات (أنوية) الهيدروجين والهليوم والليثيوم والديتريوم مكونة ذرات الهيدروجين والهليوم والليثيوم والديتريوم. ويصبح الخليط الكوني يتكون من $H, D, He, Li, H^+, H^-, He^+, D^+, Li^+$. حيث تتكون الذرات من اتحادها مع الإلكترونات :

$^1H^+ + e \rightarrow H +$ طاقة

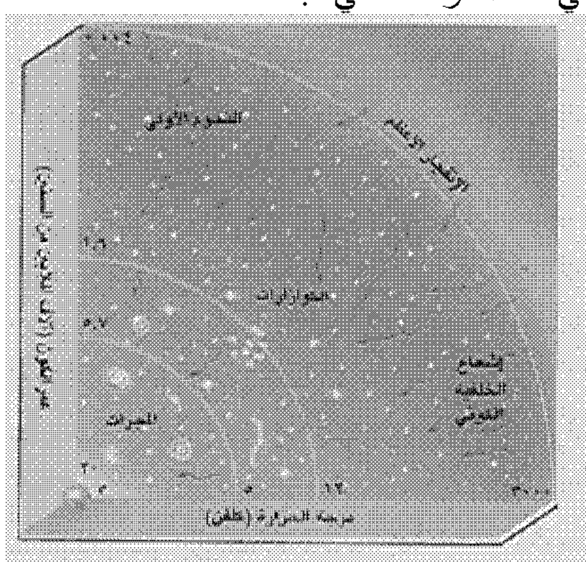
$He^{2+} + e \rightarrow He +$ طاقة

$He^+ + e \rightarrow He+$ طاقة

بعد حوالي مليون سنه : من الانفجار العظيم وصلت درجة حرارة المادة إلي حوالي 4000 درجة ، وبرد الكون إلي أقل من درجه حرارة سطح الشمس عندئذ تمكنت الإلكترونات من الاتحاد مع الأنويه لتشكل ذرات

$H + H \rightarrow H_2 +$ طاقة.

والأحداث الأخيرة المهمة في القصة هي عندما بدأ الغاز في التكتل ليشكل المجرات ، و لكن قبل تكون المجرات بدأت تفاعلات كيميائية بين مكونات الكون في تلك الفترة فما هي ؟.



توزيع المادة في الكون عبر الزمن

أول نموذج كيميائي للكون

The Chemistry of Early Universe

عندما بلغت درجة حرارة الكون 4000 درجة مطلقة بدأ الكون يبرد بقدر أصبحت فيه الظروف مهيأة بحدوث تفاعلات كيميائية من النوع الاتحادي Recombination وفي تلك الفترة تحولت المادة بسرعة من الحالة الأيونية للذرات Fully ionized state إلى الحالة المتعادلة neutral state. وبهذا تكون جزيء الهيدروجين من نوعين من التفاعلات :الأول من اتحاد ذرة الهيدروجين مع الإلكترونات فيما يسمى بالارتباط المشع للطاقة Radiative attachment ليكون أيون الهيدروجين السالب وخروج الطاقة .

$H + e \rightarrow H^- + photon$

وأيون الهيدروجين السالب يتحد مع ذرة الهيدروجين فيما يسمى بالفك الترافقي Association detachment ليكون جزيء الهيدروجين ويخرج إلكترون

$H + H^- \rightarrow H_2 + e$

أما الطريقة الثانية لتكوين جزئ الهيدروجين وهي تبدأ بتفاعل ذرة الهيدروجين مع أيون الهيدروجين الموجب فيما يسمى بالتجمع المشع Radiative association لينتج جزيء موجب الهيدروجين وإلكترون.

$H + H^+ \rightarrow H_2^+ + photon$ (طاقة)

ويتبع هذا تفاعل انتقال الشحنة Charge transfer من جزيء موجب الهيدروجين إلى ذرة الهيدروجين.

$H + H_2^+ \rightarrow H_2 + H^+$

وكل من أيون سالب وجزيء موجب الهيدروجين يزولان من الوسط بتفاعل مع الفوتونات

مع تمدد الكون وتكون الهليوم يتبعه تكون جزيء هيدرايد الهليوم المتأين (HeH^+) ionic helium hydride بواسطة الاتحاد المشع للطاقة Radiative association مع أيون الهيدروجين

$He + H^+ \rightarrow HeH^+ + photon$ (طاقة)

وهذا الأيون يعتبر من أول الجزيئات التي تكونت في الكون ،ولكن فترة عمره قصيرة حيث يتحول لهليوم بواسطة عملية التفكك الاتحادي dissociation recombination

$HeH^+ + e \rightarrow He + H$

التي تعتبر من أسرع الطرق لتحويل الأيونات إلي ذرات. وكذلك الجزء المتبقي من HeH^+ مع مرور الزمن يتحد مع الهيدروجين ليكون H_2^+

$HeH^+ + H \rightarrow He + H_2^+$.

بعد تكون H_2 يتكون أيون ثلاثي ذرات الهيدروجين H_3^+ الذي يعتبر من أهم الأيونات في كيمياء مادة ما بين النجوم. هذا الأيون يتكون بثلاث طرق : الأولى باتحاد H_2 مع H_2^+

$H_2^+ + H_2 \rightarrow H + H_3^+$.

والثانية والثالثة باتحاد H_2 مع H^+ أو الهيدروجين المثار H^*

$H^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + photon$

$H^* + H_2 \rightarrow H_3^+ + e$.

وأيون ثلاثي ذرات الهيدروجين يتكسر بواسطة الإلكترون ليتحول إلي H و H_2

$H_3^+ + e \rightarrow H_2 + H$

$H_3^+ + e \rightarrow H + H + H$.

وبوجود كل من He, H_2^+ , H_2 , H , H_3^+, يمكن أن تتكون بعض جزيئات الديوتيروم Deuterated molecules التي تعتبر من أهم المكونات في بداية الكون لأنها قطبية التكوين. هذه الجزيئات هي HD^+, HD, HeD^+. وتتكون وتتكسر هذه الجزيئات علي النحو التالي :

$H^+ + D \rightarrow D^+ + H$

$D^+ + H_2 \rightarrow H^+ + HD$

$D + H \rightarrow HD + photon$

$H_3^+ + D \rightarrow H_2D^+ + H$

$H_2^+ + HD \rightarrow H_2D^+ + H$

$HD^+ + H_2 \rightarrow H_2D^+ + H$

$H_2D^+ + e \rightarrow H + D + H$

$H_2D^+ + e \rightarrow H_2 + D$

$H_2D^+ + e \rightarrow HD + H$.

كما ذكرنا سابقا أنه في الحقبة الأولى من الكون ومع تمدد الكون والانخفاض المستمر لدرجة الحرارة ، تكونت الذرات من الأنوية والإلكترونات الطليقة. ثم بعد ذلك فيما يطلق عليه ما بعد فترة الاتحاد post recombination epoch ، تكونت الجزيئات من اتحاد الذرات. وبالتالي أصبحت

وفي هذه المرحلة من عمر الكون بدأت كيمياء الليثيوم بتكون أيون موجب وسالب الليثيوم. فأيون الليثيوم تكون عن طريق تأين الليثيوم بواسطة الفوتونات photoionization

$Li + photon \rightarrow Li^{+} + e$

وبواسطة تفاعلات انتقال الشحنة charge transfer بين الليثيوم وأيون الهيدروجين وأيون جزئ الهيدروجين

$Li + H^{+} \rightarrow Li^{+} + H$
$Li + H_2 \rightarrow Li^{+} + H_2.$

ولقد تحول أيون الليثيوم إلى ذرة ليثيوم عن طريق تفاعله مع الإلكترونات

$Li^{+} + e \rightarrow Li + photon$

وأيون سالب الهيدروجين

$Li^{+} + H^{-} \rightarrow Li + H.$

أما أيون سالب الليثيوم فقد تكون عن طريق اتحاد الليثيوم مع الإلكترونات

$Li + e \rightarrow Li^{-} + photon$

ويتحول إلى ذرة ليثيوم عن طريق تفاعله مع الفوتونات

$Li^{-} + photon \rightarrow Li + e$

بينما هيدرايد الليثيوم Lithium hydride تكون بطريقتين : الأولى بدأت بتفاعل الليثيوم و أيونه مع الهيدروجين و أيونه لتكوين أيون هيدرايد الليثيوم

$Li^{+} + H \rightarrow LiH^{+} + photon$
$Li + H^{+} \rightarrow LiH^{+} + photon$

الذي تفاعل مع الهيدروجين لينتج LiH

$LiH^+ + H \rightarrow LiH + H^+$.

والطريقة الثانية بدأت بتفاعل أيون سالب الليثيوم مع الهيدروجين

$Li^- + H \rightarrow LiH + e$.

ويتكسر هيدرايد الليثيوم بتفاعله مع الفوتونات والهيدروجين وأيونة

$LiH + photon \rightarrow Li^+ + H$
$LiH + H^+ \rightarrow Li + H_2^+$
$LiH + H \rightarrow Li + H_2$
$LiH + H^+ \rightarrow Li^+ + H_2$.

والاتجاه العكسي للتفاعلين الأخيرين من السلسلة السابقة ماص للحرارة بمقدار 1.961 و 10.191 إلكترون فولت على التتابع.

ويتحول أيضا هيدرايد الليثيوم إلى أيونة عن طريق تفاعل انتقال الشحنة

$LiH + H^+ \rightarrow LiH^+ + H$.

وهناك طريقة أخرى لتكون هيدرايد الليثيوم ، والتي تبدأ بتفاعل أيون الليثيوم مع جزئ الهيدروجين ليتكون LiH_2^+

$Li^+ + H_2 \rightarrow LiH_2^+ + photon$
$Li + H_2^+ \rightarrow LiH_2^+ + photon$

والذي يتفاعل مع الإلكترونات ليكون LiH

$LiH_2^+ + e \rightarrow LiH + H$.

ولكن هذه الطريقة غير مهمة في تكوين هيدرايد الليثيوم في تلك الفترة لقلة كمية تركيز جزئ الهيدروجين وايونة ، ولكنها في غاية الأهمية لكيمياء الليثيوم في مادة ما بين النجوم.

ويتكون LiH_2 باتحاد H_2 مع LiH

$LiH + H_2 \rightarrow LiH_2 + H$.

وفي هذه المرحلة لا يتحول كل الليثيوم إلي هيدرايد الليثيوم ، لان معظم الليثيوم يكون في حالة متأينة. وهذه الجزيئات نسبة وجودها Fractional abundances صغيرة للغاية لدرجة صعوبة رصدها في الكون حتى الآن. لان ذرة الليثيوم تتفكك بسرعة في الجوف الحار لمعظم النجوم.

وفي النهاية يمكن القول مما سبق أن معظم مادة الكون قبل تكون المجرات والجيل الأول من النجوم كانت من الهيدروجين والهليوم ونسبة قليلة جدا من جزيء الهيدروجين والديوتيروم وهيدرايد الديوتيروم والليثيوم.

الهوامش

1- مجدي يوسف أمين " **تأثير الموجات الصدمية علي كيمياء سحابة بين نجمية منكمشة** " 1991 رسالة ماجستير جامعة القاهرة
2- مجدي يوسف أمين " **الجزيئات في بداية الكون** " مجلة الجمعية الكيميائية الكويتية العدد سنة 1999
3- ممدوح كامل الموصلي " **الكون في الدقائق الثلاث الأولى** " كتاب الغد 1985
4- جلال عبد الفتاح " **الكون ذلك المجهول** " الهيئة المصرية العامة للكتاب 1994
5- رؤوف وصفي " **رحلة مذهلة في قلب المادة** " الثقافة العالمية العدد 68 سنة 1995 الكويت

6- A. Dalgarno . " **Molecular Astrophysics** " 1985 .ed. G.H.F. Diercksen , W.F. Huebner and P.W. Langhoff. (Reidel) P. 218
7- W.W. Duley and D.A. Williams " **Interstellar Chemistry** " 1984. Academic Press Inc. (London) LTD
8- Abell Morrison Wolff " **Exploration of the Universe** " sixth edition . Saunders College Publishing
9- Zeilik G. " **Astronomy and Astrophysics** " 1998. Saunders college publishing
10- Dalgarno A. " **Atomic and molecular data and their applications** " 1998. Ed.

P.J. Mohr and W.L. Wiese. The american institute of physics

11- Stancil P.C., Leep S. and Dalgarno A. “ **The deuterium chemistry of the early universe** “ 1998. Astrophysical journal 509, p1-10.

12- John,S. Lewis 1995. “ **physics and chemistry of the solar system**”. Academic press INC

13- Ya.A.S. Smorodinsky 1976 “**Particles quanta waves” .** Mir Publishers, Moscow

14- Kenneth S. Krane 1988. “**Introductory nuclear Physics”.** John Wiley and Sonc. INC.

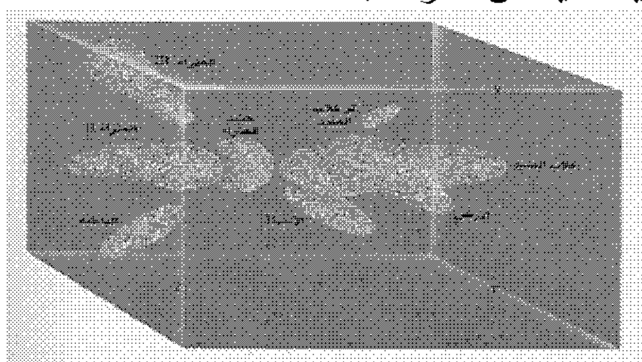
الباب الثالث

كيمياء النجوم Stellar Chemistry

مقدمة

بعد الانفجار العظيم وتكون الهيدروجين والهليوم نتيجة لانخفاض درجة الحرارة والتمدد ، ومع استمرار التمدد وانخفاض درجة الحرارة انتشر الهيدروجين والهليوم في جميع الاتجاهات. وكان الكون في ذلك الوقت عبارة عن سحابة متجانسة من الغازات تقل كثافتها تدريجيا للخارج نتيجة للتمدد المستمر.

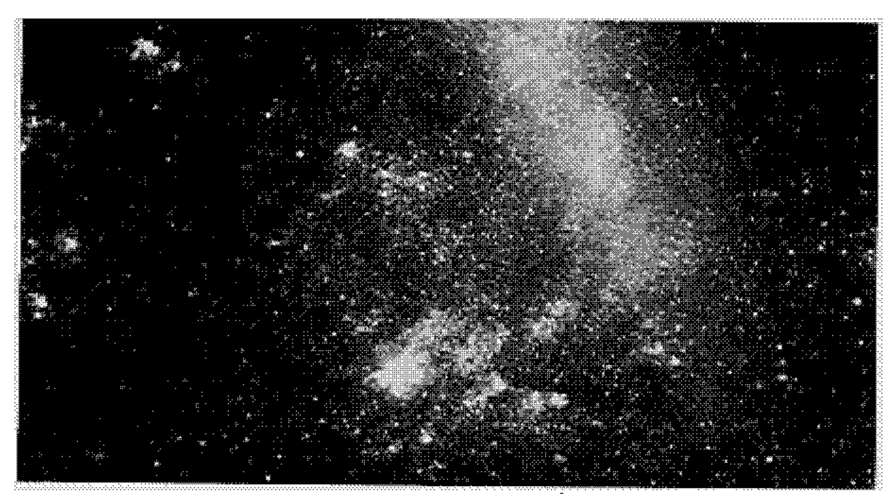
ونتيجة للحركة العشوائية للغازات والحركات الدوامية ، تكونت مناطق تدور بسرعات مختلفة وتتسم بكثافات مختلفة وتغير مستمر في مواقعها ، وتفصل بينهم مناطق أخري ذات كثافة أقل. ونتيجة لهذا التغير الفيزيائي أصبح للجاذبية دور في كل منطقة حيث بدأت الجاذبية في تصيد الذرات المتحركة عشوائيا ومنعها من الإفلات. وبزيادة الكثافة لدرجة عالية تمكنت الجاذبية من اقتناص ذرات الغازات التي توجد في مناطق الكثافة الضعيفة ، وهذا أدى بالتبعية إلي زيادة الفوارق بين المناطق المختلفة. وتبع ذلك تقسيم السحابة الأولية للكون إلي سحب ضخمة تفصلها فراغات تكاد تكون من عدم. وهذه السحب منها من كونت المجرات البدائية. وكل سحابة من تلك السحب أصبحت بعد ذلك تتكون من بلايين من سحب الغاز المحدودة ذات الأحجام المختلفة ، والتي تفصل بينها مسافات تحتوي على كميات قليلة من الغازات .



توزيع المجرات في الكون

تطور النجوم Stellar Evolutions

بدأت كل واحدة من السحب التي تكونت داخل المجرات في تكوين مجال جاذبية خاص بها يعتمد علي كثافتها وكتلتها وسرعة دورانها حول محورها. ومن تلك السحب من كانت لها كتلة تمكنها من قوة جذب ذاتية في اتجاه مركزها بحيث تبدأ في الانكماش.



سحابة ماجلان الكبرى . اللون الأحمر يدل على وجود نجوم نشطة وعدد كبير من العملاقة الحوراء

وما إن تبدأ السحابة التي تقدر كتلتها بكتلة الشمس أو اقل قليلا في الانكماش حتى تزداد كثافتها وبالتالي تزداد قوة جاذبيتها فتنشط آلية الانكماش أكثر فأكثر. وتبدأ الكتلة المنكمشة في التسخين ويأخذ غاز المناطق المحيطة بها في الدخول إلي طور جنين النجم proto-star فتزداد كتلته. وتأتي الزيادة في درجة الحرارة من تحول طاقة الوضع potential energy إلي طاقة حرارية thermal. وحتى هذه المرحلة لا تكون درجة حرارة النجم الأولي قد ارتفعت بالقدر الذي يسمح بالإشعاع في نطاق الطيف المرئي ، وإنما يمكن أن يتم الإشعاع في النطاق تحت الأحمر. ومع مرور الزمن تزداد كثافة المادة في مركز السحابة إلي أن تصل إلي مرحلة لا تسمح للأشعة تحت الحمراء أن تخرج منها . وعند هذه اللحظة يصبح مركز السحابة كمخزن حراري فترتفع درجة الحرارة فيه بشكل سريع ، حتى تبلغ درجة حرارة النجم الأولي خمسمائة ألف درجة مطلقة أو بالقرب من ذلك ، يمكن أن يبدأ تصادم بروتونين - وكل بروتون هو في الواقع عبارة عن نواة ذرة هيدروجين منزوعا منها إلكترونها الوحيد ليكونا معا أيون أو نواة الديوتريوم . وكناتج جانبي للاصطدام ينشأ منه فائض من الطاقة ونيوترينو وإلكترون موجب (البوزيترون)

$^{1}H + ^{1}H \rightarrow D + e^{+}$ +نيوترينو+ (1.179 M ev طاقة قدرها)

وهذا التفاعل يساعد علي ارتفاع درجة الحرارة ، لأنه في جزء من الثانية من هذا التفاعل يصطدم البوزيترون مع الإلكترون العادي فيتلاشيان معا وينبعث عنهما قدر من الطاقة مساو لمجموع كتلتيهما.

وأيونات الديوتريوم الناتجة في بضع ثواني تبدأ في التفاعل مع بروتون أخر، فتصبح ثلاثة بروتونات معا. ويتحول أحدهما إلي نيوترون فاقدا شحنته وتتكون نواة خفيفة للهليوم-3 ^{3}He وخروج فوتون

$D + ^{1}H \rightarrow ^{3}He$ + فوتون+ (5.493 M ev طاقة قدرها)

وبهذا التفاعل تتحرر بعض الطاقة فتعمل علي زيادة درجة الحرارة الداخلية للنجم.

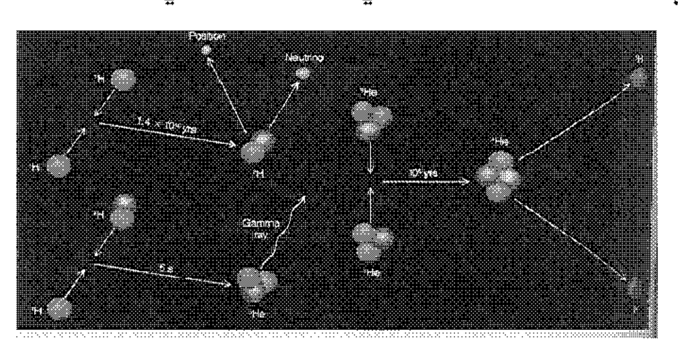
وسواء حدث تفاعل الديوتريوم أو لم يحدث فإن درجة الحرارة تستمر في الصعود ولكن ببطء بعض الشيء . وعندما تصل درجة الحرارة إلي خمس عشر مليون درجة مطلقة تبدأ التفاعلات النووية في الاشتعال بدورة البروتون-بروتون proton-proton interaction لإنتاج نوى هليوم من نوى الهيدروجين . وفي هذه الدورة يتم تكوين الهليوم من خلال أحد ثلاث دورات. **والدورة الأولي** تتكون من ثلاث خطوات يمكن وضعها حسب المعادلات الآتية :

$^{1}H + ^{1}H \rightarrow ^{2}H + e^{+}$ + نيوترينو+ (1.179 Mev طاقة قدرها)

$^{2}H + ^{1}H \rightarrow ^{3}He$ + فوتون+ (5.493 Mev طاقة قدرها)

$^{3}He + ^{3}He \rightarrow ^{4}He + ^{1}H + ^{1}H$ + (12.859 Mev طاقة قدرها)

وفي هذه العملية يتم إنتاج الهليوم-4 ^{4}He وخروج بروتونين وفوتون طاقة. وهذه هي الدورة الأساسية لإنتاج الطاقة في كل النجوم الصغيرة . وبحدوث ذلك يكون النجم الأولي قد أصبح نجما بالغا وينتهي أمر السحابة الغازية إلي مولد نجم جديد.



دورة بروتون-بروتون لتحويل الهيدروجين إلى هليوم

أما الدورة الثانية لتكوين الهليوم فهي

$^{3}He + ^{4}He \rightarrow ^{7}Be$ + فوتون + (1.586 Mev طاقة قدرها)

$^{7}Be + e \rightarrow ^{7}Li$ + نيوترينو + (0.061 Mev طاقة قدرها)

$^{7}Li + ^{1}H \rightarrow ^{4}He + ^{4}He$ + (17.347 M e. v طاقة قدرها)

ففيها تتفاعل نواة هليوم-3 مع نواة هليوم-4 فينتج نواة بيريليوم-7 ^{7}Be مع إشعاع فوتون. وعن طريق امتصاص إلكترون يتحول ^{7}Be إلي نواة ليثيوم-7 ^{7}Li مع إشعاع نيوترينو. وبتفاعل ^{7}Li مع بروتون تنتج نوتان من هليوم-4 . وحتى تبدأ هذه الدورة لابد أن تكون نويات هليوم-3 قد تكونت بالفعل. أي لابد أن تكون الخطوتان الأوليان من الدورة الأولى قد تمتا.

والدورة الثالثة تأتي بعد الخطوة الأولى من الدورة الثانية

$^{7}Be + ^{1}H \rightarrow ^{8}B$ + فوتون + (0.135 Mev طاقة قدرها)

$^{8}B \rightarrow ^{8}Be^{*} + e^{+}$ + نيوترينو + (15.78 Mev طاقة قدرها)

$^{8}Be^{*} \rightarrow 2^{4}He$ + (0.095 Mev طاقة قدرها)

حيث يتفاعل بيريليوم-7 مع بروتون وتنتج نواة بورون-8 وخروج طاقة . ونواة البورون -8 غير مستقرة فتتحلل مع انطلاق بوزيترون ونيوترينو إلي نواة بيريليوم-8 المثارة ، وهذه بدورها تتحلل إلي نواتي هليوم-4 .

ومن شأن الطاقة المنطلقة من دورة بروتون-بروتون أن تحفظ للب النجم حرارته وتنتج له القدرة علي التصدي للانكماش ما دامت إمدادات وقود الهيدروجين باقية.

وعندما يتحول كل الهيدروجين إلى هليوم في لب النجم تتوقف التفاعلات النووية في اللب وبالتالي يبرد لب النجم فيزداد انكماشه نحو المركز لتغلب قوة الجاذبية على الضغط ، ومن ثم ترتفع درجة الحرارة في المنطقة المحيطة باللب ، والتي تبدأ التفاعلات النووية فيها وتتسارع بفعل حرارة الانكماش . ومع استمرار الانكماش وزيادة التفاعلات في المنطقة المحيطة بالمركز ترتفع درجة الحرارة ويتمدد الجزء الخارجي من النجم وبالتالي يبرد سطحه ولكن اللب يستمر في الانكماش ، وينتج عن تمدد النجم زيادة كمية الإشعاع ، ونتيجة نقص درجة الحرارة يصبح النجم عملاقا أحمر بنصف قطر يزيد من 10-100مرة عن نصف قطره الابتدائي ونسميه في هذه المرحلة العملاق الأحمر Red Giant، وتكون ثلث كتلة النجم موجودة في اللب .

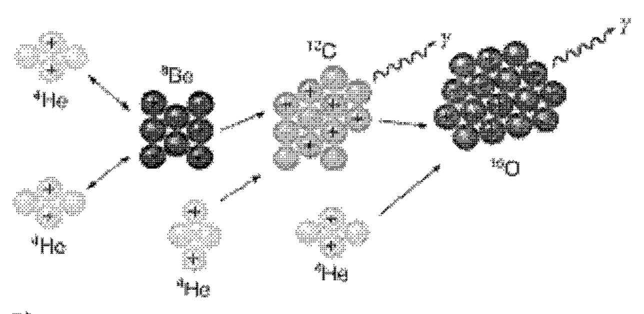
ومن خصائص الإلكترونات أنه يوجد حد أدنى للمسافات بينها بحيث لا تقترب من بعضها البعض بعد هذه الحدود وبالتالي فإن عملية الانكماش في اللب تتوقف عند الحدود التي تكون عندها الإلكترونات قد تزاحمت لدرجة أنها لا تستطيع أن تتقارب من بعضها أكثر من ذلك . وهذه الحالة تعرف بحالة التحلل degenerate state . وهي تتميز بأن حجم اللب لا يتغير مع زيادة الضغط ، فتتحول الطاقة الناتجة عن الضغط إلى زيادة الحرارة في المركز بسرعة هائلة بحيث تبدأ تفاعلات الهليوم وهي ما تعرف بشرارة الهليوم .وتحدث هذه العملية عندما تصل درجة الحرارة مائة مليون درجة مطلقة حيث يحترق الهليوم ويبدأ في التحول إلي كربون وخروج طاقة

$^{4}He + ^{4}He \rightarrow ^{8}Be$ + (0.0921 Mev طاقة قدرها)

$^{8}Be + ^{4}He \rightarrow ^{12}C^{*}$ + (0.286 Mev طاقة قدرها)

$^{12}C^{*} \rightarrow ^{12}C$ + فوتون + (7.656 M e. v طاقة قدرها)

حيث تتفاعل نواتي هليوم-4 لتنتج نواة البريليوم-8 الغير مستقرة والتي تتفاعل مع نواة هليوم-4 في زمن قدرة $2.6x10^{-16}$ ثانية لتنتج نواة كربون-12 مثار (هذه الدورة تسمى تفاعلات ألفا الثلاثية The Triple Alpha Reaction) والتي تتحلل إلى كربون -12 مع خروج فوتون وطاقة.



تفاعلات ألفا الثلاثية

إن عملية بدء التفاعلات النووية للهليوم تأخذ وقتا قصيرا جدا قد يكون عدة دقائق ومن الصعب أن نرصد هذه المرحلة لأنها تحدث في اللب الداخلي للنجوم . ومع بداية تفاعل الهليوم وتحوله إلى كربون عن طريق تفاعلات ألفا- ثلاثية (أي تفاعل ثلاث أنوية (هليوم) تنتهي حالة التحلل ليعود الغاز في لب النجم قليلا إلى الحالة الطبيعية وهي زيادة الضغط مع زيادة الحرارة حيث يتمدد ويصبح لونه أشد زرقة أي إنه يصبح أسخن من ذي قبل . ويستمر النجم في تحويل الهليوم إلى كربون فترة من الوقت حسب كتلته وبالتالي سرعة إشعاعه كما أن تفاعلات ألفا-ثلاثية تتأثر كثيرا بأي تغير طفيف في الحرارة فمع كل زيادة بسيطة في درجة الحرارة تزداد كمية التفاعلات النووية في اللب ويزداد مقدار الإشعاع وهكذا فإن النجم يتطور بسرعة في هذه المرحلة أكثر مما كان علية الحال في مرحلة احتراق الهيدروجين. وبعد أن يتحول كل الهليوم في اللب إلى كربون يدخل النجم في مرحلة جديدة من حياته ، حيث تتوقف التفاعلات في اللب وتتكون حوله طبقة يتحول فيها الهيدروجين إلى هليوم . وكما حدث عند توقف تفاعلات الهيدروجين ينكمش اللب تحت تأثير الجاذبية وبالتالي تزداد الحرارة مرة ثانية فيتمدد النجم مرة أخرى ليصبح عملاقا أحمر Red giant مرة ثانية. ومع انكماش اللب وازدياد درجة الحرارة بسرعة يزداد الضغط حتى تصل الإلكترونات إلى حالة التحلل مرة أخرى وبالتالي يتوقف الانكماش مما يؤدي إلي حدوث صدمة عكسية كرد فعل على عدم انضغاط اللب تؤدي إلى تمدد النجم وفي هذه الحالة تحدث تطورات

تنتهي التفاعلات للنجم الذي لـه كتلـة شمسية عند الكربـون ، فليس لديه من القوة ما يجعله قادرا على أن يستمر في تفاعلات نووية تحتاج إلى حرارة لا تتوفر لديه ، ويعرف النجم في هذه الحالة بالقزم الأبيض .

أمـا النجـوم التـي تـصغر الـشمس فـي الكتلـة فإنهـا تـسير فـي مـسار مشابه لقصة حياة الشمس . فهذه النجوم تتطور ببطء شديد بحيث نجد مثلا أن نجما كتلتـه 74% مـن كتلـة الـشمس لابـد وأن يقضي فتـرة تقـرب مـن 20 بليون سنة في دورة احتراق الهيدروجين . وعلى فرض أن نجمـا هكذا بـدأ حياته بعد فترة وجيزة من نشأة الكون فإنه ما زال موجودا في الـسماء ذلـك لأن عمر الكون في حدود 20 بليون سنة تقريبا .

إن النجوم ذات الكتل الأكبر من الشمس بمقدار أقل مـن 12 ضـعف كتلة الشمس ، ترتفع درجات الحرارة فيها إلى قيم أعلـى مـن الـشمس لـذلك فإنها تختلف فـي مـسارها عن مـسار النجـوم الـشبيهة بالـشمس ، حيـث يبـدأ الـنجم تفاعلاتـه النوويـة بتحويـل الهيـدروجين إلـى هليـوم من خـلال سلـسلة بروتون-بروتون ولكن سرعان مـا ترتفـع الحـرارة بـشدة بحيـث يبـدأ تحـول

عندما يتكون لب من الهليوم وتبدأ عملية انكماش اللب فإن درجة الحرارة ترتفع بسرعة مع الانكماش لتبدأ التفاعلات النووية للهليوم قبل أن تصل الكثافة إلى مرحلة تحلل الإلكترونات .

تستمر التفاعلات النووية إلى مرحلة ما بعد الكربون إلى العناصر الأثقل ولكن تتوقف التفاعلات النووية في مرحلة ما قبل تكوين الحديد في لب النجم ، ثم تبدأ عملية الانكماش في اللب والتمدد في الطبقات الخارجية ليصبح النجم عملاقا أحمر ويتمدد النجم عدة مرات مع كل انتهاء مرحلة من مراحل التفاعلات النووية بحيث يزداد حجم العملاق الأحمر وفي النهاية يحدث قذف للطبقات الخارجية فيما يعرف بظاهرة السدم الكوكبية وبعدها يصبح النجم لبا عاريا في درجة حرارة عالية وكتلة تقل عن 1.4 كتلة الشمس .

وبمجرد احتراق الهليوم وتكون الكربون-12 تزيد درجة الحرارة على مائة مليون درجة مطلقة ويبدأ احتراق الكربون بتفاعل الكربون-12 مع هليوم-4 ليكون أكسجين-16 وخروج طاقة

$^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O$ + فوتون + (7.161 Mev طاقة قدرها)

ثم يتفاعل الكربون مع نفسه لينتج كل من ماغنسيوم -23 ^{23}Mg وماغنسيوم -24 ^{24}Mg والصوديوم-23 ^{23}Na والنيون-20 ^{20}Ne وأكسجين-16 مع خروج هليوم-4 وبرتون ونيوترون وطاقة عند درجة حرارة قدرها ثماني مائة مليون درجة مطلقة.

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He$ + (4.616 Mev طاقة قدرها)

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Na + {}^{1}H$ + (2.238 Mev طاقة قدرها)

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Mg$ + نيوترون + (2.605 Mev طاقة قدرها)

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{24}Mg$ + فوتون + (13.93 Mev طاقة قدرها)

$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}O + 2\,{}^{4}He$ + (0.114 Mev طاقة قدرها)

ويتفاعل أيضا الكربون-12 مع نواة الهيدروجين لينتج نيتروجين-13 الذي يتحلل إلي كربون-13 الذي يتفاعل مع هليوم-4 لينتج أكسجين-16 مع خروج طاقة وبوزيترون ونيوترون ونيوترينو

$^{12}C + ^{1}H \rightarrow ^{13}N +$ فوتون + (طاقة قدرها 1.944 Mev)

$^{13}N \rightarrow ^{13}C + e^{+} +$ نيوترينو + (طاقة قدرها 1.511 Mev)

$^{13}C + ^{4}He \rightarrow ^{16}O +$ نيوترون + (طاقة قدرها 2.214 Mev)

أو يتفاعل كربون-13 مع نواة الهيدروجين لينتج نيتروجين-14 مع خروج طاقة

$^{13}C + ^{1}H \rightarrow ^{14}N +$ فوتون + (طاقة قدرها 7.55 Mev)

ثم يتفاعل نيتروجين-14 مع نواة الهيدروجين لينتج أكسجين-15 وخروج طاقة

$^{14}N + ^{1}H \rightarrow ^{15}O +$ فوتون + (طاقة قدرها 7.293 Mev)

ويتحلل أكسجين-15 إلي نيتروجين-15 الذي يتفاعل مع نواة الهيدروجين ليكون كربون-12 مرة أخرى أو أكسجين-16

$^{15}O \rightarrow ^{15}N +$ بوزيترون نيوترينو (طاقة قدرها ev)

$^{15}N + ^{1}H \rightarrow ^{12}C + ^{4}He +$ (طاقة قدرها 4.965 Mev)

$^{15}N + ^{1}H \rightarrow ^{16}O +$ فوتون + (طاقة قدرها 12.126 Mev)

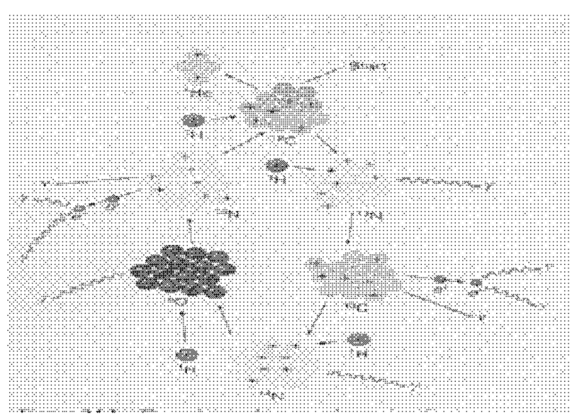
وبوجود أكسجين-16 يبدأ احتراقه بتفاعله مع نواة الهيدروجين ليكون فلور-17 ^{17}F الغير مستقر والذي يتحلل إلي أكسجين-17 الذي بدوره يتفاعل مع نواة الهيدروجين ليكون نيتروجين-14

$^{16}O + ^{1}H \rightarrow ^{17}F +$ فوتون + (طاقة قدرها 0.601 Mev)

$^{17}F \rightarrow ^{17}O +$ بوزيترون + نيوترينو + (طاقة قدرها 1.822 Mev)

$^{17}O + ^{1}H \rightarrow ^{14}N + ^{4}He +$ (طاقة قدرها 1.193 Mev)

وفي نهاية هذه الدورة يتكون أكسجين-16و الكربون-12 والنيتروجين-14 مع بعض Ne,Na,Mg. ويطلق على هذه الدورة دورة CNO في تطور نجوم الجيل الثاني ذات الكتل الكبيرة والحرارة المرتفعة Hot stars .



دورة الكربون

ويبدأ تحول النيتروجين-14 إلي عناصر ثقيلة بتفاعله مع الهليوم-4 ليكون الفلور-18 الغير مستقر الذي يتحلل إلي أكسجين-18

$^{14}N + ^{4}He \rightarrow ^{18}F +$ فوتون + (4.416 Mev طاقة قدرها)

$^{18}F \rightarrow ^{18}O +$ نيوترينو+بوزيترون

ويتكسر أكسجين-18 بواسطة الهليوم-4 ليتحول إلي نيون-21 ونيون-22

$^{18}O + ^{4}He \rightarrow ^{21}Ne +$ نيوترون_ (0.699 Mev طاقة قدرها)

$^{18}O + ^{4}He \rightarrow ^{22}Ne +$ فوتون+ (9.661 Mev طاقة قدرها)

ويتبع هذين التفاعليين تكسير النيون-22 بواسطة هليوم-4 ليتكون ماغنسيوم-25 و ماغنسيوم-26

$^{22}Ne + ^{4}He \rightarrow ^{25}Mg +$ نيوترون_ (0.481 Mev طاقة قدرها)

$^{22}Ne + ^{4}He \rightarrow ^{26}Mg +$ طاقة

وعندما تبلغ درجة الحرارة حوالي مليارين درجة مطلقة (2×10^{9}) يتفاعل الأكسجين-16 مع نفسه لينتج كبريت-32 وفوسفور-31 وسيليكون-28 وماغنسيوم-24

$^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{32}S +$ فوتون+ (16.539 Mev طاقة قدرها).

$^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{31}S +$ نيوترون+ (1.459 Mev طاقة قدرها).

$^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{31}P + ^{1}H +$ (7.676 Mev طاقة قدرها).

$^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{28}Si + ^{4}He +$ (9.543 Mev طاقة قدرها).

$^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{24}Mg + 2\ ^{4}He$ _ (0.393 Mev طاقة قدرها).

وعند هذه الدرجة أو أقل منها بقليل يتفاعل ماغنسيوم-24 ونيون-20 وأكسجين-16 مع الفوتونات

^{24}Mg + photon $\rightarrow ^{23}Na + ^{1}H$ _ (11.694 Mev طاقة قدرها).

^{24}Mg + photon $\rightarrow ^{20}Ne + ^{4}He$ + (9.317 Mev طاقة قدرها).

^{20}Ne + photon $\rightarrow ^{16}O + ^{4}He$ + (4.73 Me v طاقة قدرها).

^{16}O+ photon $\rightarrow ^{12}C + ^{4}He$ + (7.161 Mev طاقة قدرها).

مع امتصاص طاقة من الوسط.

وبتكون ماغنسيوم-25 الناتج من تفاعل النيون-22 مع الهليوم-4 يبدأ السيليكون-28 في الظهور باحتراق الماغنسيوم مع هليوم-4

$^{25}Mg + ^{4}He \rightarrow ^{28}Si$ + نيوترون

والسيليكون-28 سريع التفاعل مع هليوم-4 في هذا الوسط ذو الحرارة المرتفعة وبالتالي تتكون العناصر ذوات العدد الذري الكبير ،فتبدأ بتكون الكبريت-32 ^{32}S والذي يتفاعل مع هليوم-4 لينتج الأرجون-36 ^{36}Ar الذي يتفاعل مع هليوم-4 ليكون الكالسيوم-40 ^{40}Ca الذي يتفاعل مع هليوم-4 ليكون التيتانيوم-44

$^{28}Si + ^{4}He \rightarrow ^{32}S$
$^{32}S + ^{4}He \rightarrow ^{36}Ar$
$^{32}Ar + ^{4}He \rightarrow ^{40}Ca$
$^{40}Ca + ^{4}He \rightarrow ^{44}Ti$

وعند درجة حرارة تبلغ ثلاث مليارات درجة مطلقة تتفاعل أنوية السيليكون-28 مع الفوتونات لتنتج الألمنيوم-27 ^{27}Al والماغنسيوم-24 ^{24}Mg

^{28}Si + photon $\rightarrow ^{27}Al + ^{1}H$ + (11.583 Mev طاقة قدرها).

^{28}Si + photon $\rightarrow ^{24}Mg + ^{4}He$ + (9.981 Mev طاقة قدرها).

مع امتصاص طاقة من الوسط .
ويتفاعل أيضا الكبريت-32 مع الفوتونات لينتج فوسفور-31 الذي يتفاعل مع الفوتونات لينتج سيليكون-30 الذي يتفاعل مع الفوتونات لينتج سيليكون-29 الذي يتفاعل مع الفوتونات لينتج سيليكون-28 ، وهذه العمليات تمتص طاقة من الوسط.

^{32}S + photon → ^{31}P + ^{1}H + (8.64 Mev طاقة قدرها).

^{31}P + photon → ^{30}Si + ^{1}H + (7.287 M e. v طاقة قدرها).

^{30}Si + photon → ^{29}Si + نيوترون

^{29}Si + photon → ^{28}Si + نيوترون

وحيث أن التفاعلات النووية بين أنوية العناصر الثقيلة بطيئة لوجود حاجز كولومي coulomb barrier كبير لذلك نجدها تتفاعل مع العناصر الخفيفة بسرعة وسهولة. فيتفاعل كل من التيتانيوم-44 و الكالسيوم-40 مع هليوم-4 ليكونا الفاناديوم-47 والتيتانيوم-44 الذي يتحلل إلي الاسكانديوم-44 غير المستقر، في فترة نصف عمر قدرها 47 سنة. ويتحول الاسكانديوم-44 في فترة نصف عمر مقدارها أربع ساعات إلي الكالسيوم-44

$^{44}Ti + ^{4}He \rightarrow ^{47}V + ^{1}H$
$^{44}Ti \rightarrow ^{44}Sc$
$^{44}Sc \rightarrow ^{44}Ca + e^{+}$

وبوجود الكالسيوم-44 تبدأ سلسلة تكون الحديد بتفاعل الكالسيوم-44 مع هليوم-4 الذي ينتج التيتانيوم-48 الذي يتفاعل مع هليوم-4 ليكون الكروم-52 الذي يتفاعل مع هليوم-4 ليكون الحديد-56

$^{44}Ca + ^{4}He \rightarrow ^{48}Ti$
$^{48}Ti + ^{4}He \rightarrow ^{52}Cr$
$^{52}Cr + ^{4}He \rightarrow ^{56}Fe$.

وعندما يستنفذ نجم بالغ الضخامة كل وقوده النووي ويكون قد كون في مركزه حديدا في حالة غازية يأتي الوقت الذي لا تنطلق فيه أي طاقة فلا يستطيع النجم أن يتصدى للجاذبية . وعندما تبلغ كتلة اللب الحديدي للنجم ضعفا ونصف ضعف كتلة الشمس عندئذ ينطوي اللب فجأة ليصير في حالة بالغة من الكثافة تندمج فيها جميع البروتونات والإلكترونات لتنتج نيوترونات . وينتج من هذا الانطواء كمية هائلة من

تبدأ عملية تحول الهيدروجين في النجوم ذات الكتل الكبيرة ، من 40-12مثل كتلة الشمس ، إلى هليوم حتى يتكون لب من الهليوم والذي يمر بالخطوات التي أشرنا إليها في قصة حياة النجوم الأكبر من الشمس ولكن تتميز النجوم الأكبر هنا بأنها تتطور بسرعة عالية حتى تصل لمرحلة الكربون وبعدها قد يتحول النجم إلى نجم متغير ثم نجم مستقر وقد يتكرر ذلك عدة مرات في تاريخ حياة النجوم الكبيرة ، ونتيجة قوة جاذبيتها العالية فإن التفاعلات النووية تستمر بحيث يتحول الكربون إلى أكسجين ثم كبريت وسيليكون وهكذا إلى أن يتكون الحديد في لب النجم ،وفي هذه الأثناء يفقد النجم حوالي ثلث مادته ، وبعد أن يتكون الحديد في لب النجم فإن العناصر الأثقل تحتاج إلى طاقة أكبر كي تتكون وفي نفس الوقت تعطي طاقة أقل ولذلك تمتص طاقة النجم تدريجيا ويبرد مما يساعد على انكماش النجم مرة ثانية ولكن بشكل سقوط حر وفي فترة وجيزة (حوالي 10 آلاف ثانية أي أقل من ثلاث ساعات) ولذلك تزداد كثافة اللب بحيث تتكسر الذرات وتتفاعل البروتونات والإلكترونات مكونة نيوترونات ، وينشأ عن ذلك خروج كم هائل من أشعة النيوترينو من النجم وبالتالي تتسارع عملية الانكماش بشكل أقوى حتى تصل النيوترونات إلى حالة التحلل كما حدث سابقا مع الإلكترونات ولذلك تتوقف عملية الانكماش وينبغي أن نلاحظ أن القوة التي تسبب تحلل الإلكترونات أقل بكثير من القوة اللازمة لتحلل النيوترونات ذلك لأن كتلة النيوترون أكبر بكثير من كتلة الإلكترون وبالتالي فإن مرحلة الانكماش هنا ستكون أكبر بكثير عما كان الحال في القزم الأبيض ،فيصبح اللب الداخلي شديد الصلابة بينما تستمر المادة الخارجية في الدخول بسرعة محيطة باللب ومع توقف الانكماش بسرعة تحدث صدمات عكسية تتحرك إلى خارج النجم ويتزامن خروج أشعة النيوترينو مع الصدمة ليحدث الانفجار المعروف بالسوبر نوفا. ويصبح

أما النجوم ذات الكتل الأكبر من 40 كتلة شمسية فإنها تستمر في التطور إلي مرحلة ما بعد النجوم النيوترونية حيث تنتصر الجاذبية على كل القوى الأخرى وهو ما يعرف بالثقب الأسود Black Hole ، وذلك لأن قوة الجاذبية ترغم الأشعة على العودة إليه ولذلك يبدو كثقب أسود . وتطور النجم النيوتروني إلي ثقب أسود لا يستغرق سوى 1/30 من الثانية فقط !! ولكن ليس من المعروف بالضبط أي الكتل تنتهي بحالة الثقب الأسود فإن ذلك يعتمد فيما يبدو على بعض الظروف للنجم مثل مقدار ما يفقده من مادة أثناء تطوره وكذلك سرعة دورانه . ولكن يمكن القول إن الكتل التي تزيد عن 40-30 كتلة شمسية يمكن أن تنتهي كثقوب سوداء .

وقياسا بزمن الكون فإن الانفجار السوبر نوفا يبدو حدثا لحظيا . ولعل النجوم التي تعرضت لانفجارات سوبر نوفا فيما مضى قد لفظت بعضا من مادتها في الفضاء بينما لم يكن الكثير من سحب الغاز المتبقية قد تكثفت بقدر يتيح تحولها إلى نجوم .

ويتسم معظم الجيل الأول من النجوم بالحجم المحدود وبالهدوء في استهلاك الطاقة . وذلك من شأنه أن يطيل بقاء مثل تلك النجوم في مرحلة تطورها لمدة 14 بليون سنة قبل تحولها إلي عملاق أحمر ، ومن ثم فإن معظمها مازال موجود إلي يومنا هذا.

ونجوم الجيل الأول لم تستهلك كل الغازات والسحب التي كانت موجودة في المجرة وبذلك ظلت مادة من الغازات موجودة بين نجوم الجيل الأول. وبعض السحب التي كونت نجوم من الجيل الأول كانت كتلتها وكثافتها ضخمة مما جعل هذه النجوم ذات عمر قصير وانتهي بها الأمر إلي الانفجار وتكوين السوبر نوفا وتختلط مادتها الجديدة المكونة من العناصر التي ذكرناها مع السحب الموجودة بين النجوم.

ومن المتوقع ألا تتكون نجوم في كل السحب البيننجمية لأنه مع اختلاط سحب الغاز بحمم الانفجارات ترتفع درجة حرارتها . وكلما زادت درجة الحرارة في السحابة نشطت الحركة العشوائية للذرات فيها وبالتالي تندفع تلك الذرات إلى الخارج وتسعى إلى الفكاك . ولو أن سحابة

يتبين من ذلك أن انفجارات السوبر نوفا المبكرة كان لها عدة تأثيرات . التأثير الأول هو الإبقاء على سحب الغاز ومنع تكثفها ، أما التأثير الثاني فيتمثل في تغذية تلك السحب بنويات أثقل من الهليوم والعناصر الأثقل . وفي رأي بعض العلماء قد تتحد تلك النويات الثقيلة مع الهيدروجين أو مع غيره من الجسيمات فيتكون الغبار وتصبح السحب مكونة من الغاز والغبار . وأخيرا إذا كانت السوبر نوفا بعيدة عن السحب المنكمشة فقد تساعد الموجات الصدمية الآتية منها للسحابة إلى تسريع عملية الانكماش وتكوين نجوم ذات كتل كبيرة.

ومن حين لآخر تتعرض واحدة من تلك السحب المخصبة ذريا للانقباض وتكون نجما أو عددا من النجوم بل قد تكون مجموعة كاملة من النجوم . والنجوم التي تتكون من سحب تحتوي على كمية ملموسة من الذرات ، يطلق عليها "الجيل الثاني من النجوم" ، فهي تتسم بأن بنيتها تتكون -بدرجة محدودة ولكن قابلة للقياس-من مادة نشأت في جوف نجوم قديمة صارت في حكم العدم.

والشمس تنتمي لهذا الجيل الثاني من النجوم فهي لم تتكون إلا من 4.6 بليون سنة حيث لم يكن عمر المجرة يتجاوز نحو عشرة بلايين سنة . لقد تكونت من سحابة تتميز باحتوائها نفايات (أي تركيب كيميائي مختلف عن نجوم الجيل الأول) مما وقع من انفجارات سوبر نوفا على مدى هذه البلايين من السنين . ومن ثم احتوت الشمس عند نشأتها على كمية وفيرة من الذرات الثقيلة رغم أن الغالبية العظمى من بنيتها كانت مقصورة على الهيدروجين والهليوم. وفي هذا الجيل الثاني من النجوم تحدث التفاعلات النووية السابقة ولكن باختلاف بسيط حيث تحدث دورة C-O-N عند درجة حرارة عشرين درجة مطلقة. والسؤال الآن هل الجيل الثاني من النجوم سوف ينتج لنا عناصر جديدة لم نعرفها حتى الآن؟. والإجابة على هذا تحتاج إلي مليارات من السنين. والسؤال الثاني كيف زادت الكثافة وكونت الجيل الثاني من النجوم ؟.

هيأت أرصاد النجوم ومادة ما بين النجوم للفلكيين مفاهيم حول ميلاد النجوم. هناك عدة افتراضات لميلاد الجيل الثاني من النجوم في سحب الوسط البين نجمي ، كرد فعل لبعض الأحداث مثل التصادم بين سحب الوسط البين نجمي وأحد أذرع المجرة ، أو التصادم بين سحابتين بين نجمية ، أو أحد هبّات النجوم فوق الجديدة.

كيمياء الغلاف الجوي للنجوم
Chemistry of Stellar Atmosphere

الغلاف النجمي هو الطبقة الخارجية الرقيقة في النجم والتي يشع منها الضوء مباشرة في الفضاء . والطاقة التي يتم إشعاعها لا يتم إنتاجها في هذه الأماكن وإنما في داخل النجم. ويمثل الغلاف الجوي النجمي المحطة الأخيرة التي تحدث فيها عمليات الامتصاص وإعادة الإشعاع ، وهي العمليات التي تعمل على نقل الإشعاع للخارج. وفي أغلفة النجوم يأخذ الإشعاع خصائصه التي نجدها في طيفه. بهذا فإننا نستطيع بطريقة عكسية الحصول على معلومات عن تركيب الغلاف الجوي النجمي الذي يشع هذا الطيف وذلك من تحليل طيف النجم . وأغلفة النجوم عبارة عن طبقة غازية غير متجانسة البناء . تزداد فيها الأبعاد التي تميز الحالة الطبيعية من درجة الحرارة أو الكثافة وبالتالي الضغط ناحية داخل النجم. وتعتمد هذه الأغلفة على كتلة النجم والتركيب الكيميائي الذي يحدد قدرة امتصاص الغاز ومعها أيضا قوة التفاعل المشترك بين الإشعاع والمادة.

ويعتبر الضوء الذي يصلنا من الأجرام السماوية هو الوسيلة التي تربطنا بتلك النجوم. ولأن الطاقة التي تنتج داخل النجم بعمليات نووية وذرية وتنتقل لخارج النجم تترك بصمات على الضوء الواصل إلينا من النجم ومن دراستنا لهذا الضوء الذي يأتي على شكل طيف نحصل على التركيب الكيميائي لهذه النجوم . وطيف النجم عبارة عن خلفية من الطيف المستمر المعروف بالضوء الأبيض ، وهو ناشئ من انتقال الإلكترونات بين مدارات الذرة. وفوق هذه الخلفية خطوط لامعة وخطوط معتمة وهى نوعى الخطوط الطيفية وهما شبيهان بالصور الفوتوغرافية الموجبة

والضوء الصادر من الغلاف الجوى المحيط بأحد النجوم يصدر في جميع الأطوال الموجيه وعند مرور هذا الضوء خلال سحابة كونية منخفضة الحرارة نسبيا فإن الغاز البارد يمتص جزءا من الضوء ومن ثم فأنها تظهر كخطوط معتمة. ويتكون طيف الضوء المرئي Visible light ، أي الجزء الذي يمكن إدراكه بالعين البشرية ، من الألوان الآتية : الأحمر و البرتقالي و الأصفر و الأخضر و الأزرق و النيلي والبنفسجي التي لها أطوال موجية تبدأ من 3900 أنجستروم عند نهاية اللون البنفسجي إلى 7600 أنجستروم عند نهاية اللون الأحمر .

فإذا نظرنا إلى السماء وتأملنا النجوم فسوف نجد منها ألوان عديدة فمنها الأبيض والأزرق والأصفر والبرتقالي و الأحمر علما بان تلك النجوم مكوناتها واحدة. واختلاف الألوان هذا يظهر نتيجة لاختلاف درجة حرارة كل نجم. وبمعرفة العلاقة بين اللون ودرجة الحرارة لسطح النجم أمكن تصنيف تلك النجوم إلى مجموعات ، وكل مجموعة لها نطاق حراري يختلف عن الأخرى . وبالتالي فإن النجوم قسمت إلى أنواع طيفية. وقد رتبت الأقسام أو الأنواع الطيفية Spectral class كما يلي : O- B – A – F -G –K – M – C - S ، وقد رتبت هذه الحروف في جملة مفيدة بحيث يكون كل حرف منها هو أول كلمة في تلك الجملة. والجملة هي : Oh Be A Fine Girl Kiss Me Right Now Sweet وترجمتها الحرفية .. أوه ! كوني بنتا لطيفة قبليني حالا يا حلوة. وقسم كل نوع طيفي إلي عشرة أجزاء من صفر إلي 9 (O_0 --- O_9) حيث يكون صفر أعلى في درجة الحرارة من واحد ، و واحد أعلى من اثنين و هكذا حتى تسعة. ولكل نوع طيفي لون يختلف عن الأخر ناتج من التركيب الكيميائي كما هو في الجدول (3-1) .

جدول (3-1) التقسيم الطيفي للنجوم

النوع	حدود درجة حرارة السطح	التركيب الكيميائي للسطح

O	أكثر من 20000إلي 35000	لون السطح أزرق ويحتوي علي خط طيف ضعيف للهيدروجين. وخط طيف للهليوم. وخط طيف للهليوم المتأين مرة واحدة. وخط طيف للكربون والأكسجين والنيتروجين المتأين مرتين. وخط طيف للسيليكون المتأين أربع مرات.
B	حوالي 15000	لون السطح أزرق – أبيض ويحتوي علي خط طيف قوي للهليوم المتعادل ذو طول موجي مقداره 4.3 ملم عند B2 ويضعف حتي يختفي عند B9 . ويختفي خط طيف الهليوم المتعادل. كما يظهر الخط الطيفي K للكالسيوم عند B3 . ويظهر بقوة خط طيف كل من الهيدروجين والأكسجين والسيليكون والماغنسيوم المتأين مرتين.
A	حوالي 9000	لون السطح أبيض ويحتوي علي خط طيف قوي للهيدروجين عند A0 ثم يضعف بعد ذلك. كما تظهر خطوط الطيف K, H للكالسيوم أحادي التأين من A5 إلي A9 . وتبدأ خطوط طيف المعادن المتعادلة ذريا في الظهور ويختفي ظهور الهليوم.
F	حوالي 7000	لون السطح أبيض – أصفر ويحتوي علي خط طيف ضعيف للهيدروجين. بينما تزداد قوة خطي طيف الكالسيوم K, H . وتظهر بقوة خطوط الحديد المتأين مرة واحدة وكذلك خطوط تاين الكروم والتيتانيوم.
G	حوالي 5500	لون السطح أصفر ويحتوي علي خطي طيف الكالسيوم بقوة عند G0 . وتظهر خطوط طيف المعادن قوية . ثم يبدأ ظهور خط طيف السيانوجين CN في النجوم العملاقة
K	حوالي 4000	لون السطح برتقالي – أصفر ويحتوي علي خط طيف لمعظم المعادن Metals . ويظهر خط طيف الكالسيوم عند الطول

M	حوالي 3000	لـون الـسطح أحمـر ويحتـوي علـي خـط طيف قوي لأول أكسيد التيتانيوم . ويظهر خط طيف الكالسيوم عند الطـول المـوجي 422.7 ملـم. ويظهـر خطـوط طيـف لعديـد من المعادن.
C	حوالي 3000	لون السطح شديد الاحمرار ويحتوي علي خط طيف قويـة لمركبـات الكربـون مثـل الـسيانوجين CN و جـزيء الكربـون C_2 والميثالدين CH ، ولا يظهر خط طيف أول أكسيد التيتانيوم
S	أقل من 3000	لون السطح أحمر ويحتوي علي خطوط طيف أول أكسيد الزركونيوم ZrO و أول أكـــسيد التيتـــانيوم TiO و أول أكـــسيد الثيتريوم YO وأول أكسيد اللانثنيم LaO

وفي عام 1999 م تم إضافة نوعين جديدين هما L و T. وهذان النوعان خاصان بالنجوم البنية. وقد اقترح اسم الأقزام البنيـة فـي عـام 1975م علـى يد الفلكي تـارتر Jill C. Tarter وهذا الاسم مضلل بعض الـشيء، فـالقزم البنـي يظهـر عـادة أحمـر اللـون ولـيس بنيًّـا، لكن اسم الأقزام الحمراء كان يطلق بالفعل على النجوم التي يصل حجمهـا إلـى نصف حجم الشمس، وبالتالي أطلق على تلك الأجرام الأقزام البنية.

والنـوع الطيفـي L ذات نجـوم كتلتهـا لا تـسمح بقيـام التحـول النووي للهيدروجين . وجاءت تسمية هذا النوع من النجوم بهذا الاسم مـن وجـود الليثيـوم فـي اللـب. وحيـث أن الليثيـوم يتكسر بـسرعة فـي النجـوم العاديـة وبالتـالي هذا الوجود يـدل علـى عدم وجود أي تحـول نووي في باطن هذه النجوم. ولون هذا النوع مـن النجـوم أحمـر غـامق ولمعانها يظهر قي الموجات تحت الحمـراء ، ودرجـة حـرارة سطحـها ما بين 1200 إلى 2200 كلفن. والغاز المكون لهذه النجوم بـارد جداً

ولنجوم ذات النوع الطيفي T تشبه النجوم T تاور وهي نجوم صغيرة جداً. وفي هذا النوع تكون الكثافة قليلة تشبه التي توجد في مادة ما بين النجوم ، ولا يتم فيها أي من العوامل الفيزيائية التي تحدث في النجوم العادية ،و كتتلتها تحت الحد المسموح به لحدوث تحول نووي في القلب. وهي تشبه الغلاف الجوي لكوكب المشتري. ويكون أقصى إشعاع لهذه النجوم في الطيف تحت الأحمر ويبلغ درجة حرارة سطحها حوالي ألف كلفن. وهذا يؤدي إلى تكوين جزيئات معقدة التركيب ويوجد فيها بوفرة الميثان CH_4 والماء H_2O والبوتاسيوم المتعادل.

وبالتالي أصبحت الأنواع الطيفية هي O,B,A,F,G,K,M, N, R, S, L,T. وأصبحت الجملة اللطيفة Oh Be A Fine Girl, Kiss My Lips, Top. والنجوم ذات النوع الطيفي T كتلتها تفوق كتلة المشتري بثلاثة عسر ضعفاً وهي الكتلة القصوى لاحتراق الديتيريوم. ولإكمال الطريق إلى معرفة الكيمياء ما بين والنجوم ذات النوع الطيفي T وكيمياء المشتري (حيث تبلغ درجة الحرارة حوالي 125 كلفن) تم اقتراح إضافة نوع طيفي Y للأجسام التي تخلو من حزم امتصاص الماء وتكون ذات درجات حرارة أقل من 500 كلفن. ولكن حتى الآن لم يتم رصد أجسام أكثر برودة من النجوم ذات النوع الطيفي T وذلك لصغر كتلة هذه الأجسام.

وتتم دراسة الكيمياء لهذه الأجسام باستخدام حسابات الاتزان الثيرموديناميكي. حيث أن التفاعلات الثيرموكيميائية في أجواء هذه الأجسام تحدث في بيئة ديناميكية لا يتوفر فيها الوقت للوصول لحالة

يعتبر أول أكسيد الكربون مثالاً جيداً لتفسير نظرية الاتزان الثيرمو كيميائى لأن CO هو غاز الكربون المهيمن عند درجات حرارة عالية وضغوط منخفضة، بينما CH_4 هو غاز الكربون المهيمن عند درجات حرارة عالية وضغوط عالية. إن وفرة اتزان CO تتناقص بشدة مع تناقص الحرارة. مدى الارتفاع الذي فوقه (CO) وكثافة عدد [CO] يتناقص حسب المعامل e هو ارتفاع المقياس الكيميائي لـ CO ويرمز له بـ h_{chem}.

$$h_{chem} = - \frac{[CO]/t_{chem}}{\frac{d}{dz}\left([CO]/t_{chem}\right)}$$

t_{chem} فى هذه المعادلة تمثل فترة الحياة

$$t_{chem} = - \frac{[CO]}{d[CO]/dt}$$

التحول بين CH_4 و CO يحدث خلال التفاعل الثيرموكيميائي.

$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$

على أي حال، ثلاثة جزئيات من H_2 لا تصطدم في نفس الوقت مع جزئ CO لإعطاء CH_4 وجزئ واحد من H_2O. بدلاً من ذلك فإن التفاعل وبشكل معقول يستمر خلال سلسلة من التفاعلات الأولية الآتية

$H_2 = H+H$
$CO+H_2 = H_2CO$
$H_2CO + H_2 \rightarrow CH_3 + OH$
$CH_3 + H + M = CH_4 + M$
$H+OH+M = H_2O+M$

صافى التفاعل $CO+3H_2 = CH_4 + H_2O$

هنا M التي تظهر في بعض المعادلات تكون أي جسم ثالث، وهي بشكل أحصائي He, H2 ، وهى ضرورية لامتصاص الطاقة المنبعثة

هذه السلسلة من التفاعلات الأولية تعطى $CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$ لكن سلسلة التفاعل الحقيقي أكثر تعقيداً مما هو معطى في التفاعل.

فترة الحياة الكيميائية t_{chem} لتحطم CO يتم حسابها من معدل أبطأ تفاعل أولى وهى:

$$t_{chem} = \frac{[CO]}{[H_2CO][H_2]k}$$

للتفاعل

$$H_2CO + H_2 \rightarrow CH_3 + OH$$

الثابت K للتفاعل السابق هو

$$K = 2.3 \times 10^{-10} \exp(-36,200/T)\ cm^3 S^{-1}$$

t_{chem} و h_{chem} تتناقص بشكل هائل مع تناقص درجة الحرارة في مناطق جوية حيث معامل طاقة التحفيز (Ea/R= 36.200) أكبر بكثير من درجة الحرارة T. يتم تدمير أول أكسيد الكربون بتحوله إلى $CH_4 + H_2O$ بطرود غازية تنقل للأعلى بطريقة الحمل . وزن الخلط الحملي هو

$$t_{mix} \sim H^2/K_{eddy}$$

H و K_{eddy} في هذه المعادلة هما ارتفاع مقياس الضغط ومعاملة الانصهار المعاكس العمودي. ارتفاع مقاس الضغط يعطى كعلاقة لدرجة حرارة الجو والوزن الجزيئ المتوسط (μ) والجاذبية. و معامل الانصهار المعاكس العمودي يحسب من تدفق الحرارة الحملي وهى عادة 10^7-10^9 $cm^2\ s^{-1}$.

وكيمياء أغلفة النجوم تختلف عن كيمياء الوسط البين نجمي. حيث كيمياء الوسط البين نجمي يسيطر عليها تفاعل الأيونات مع الجزيئات ion-molecule ، بينما في أغلفة النجوم حيث الاتزان الحراري فالتفاعلات تتم عن طريق تفاعل جسيمين متعادلين neutral-neutral reaction ، أو ثلاث

$A + H \rightarrow AH^*$
$AH^* + M \rightarrow AH + M.$

وتقسم أسطح النجوم بطريقتين **أولهما**: طبقا لدرجة حرارتها إلى عدة أنواع من المواد. الوسط الأول هو البلازما Plasmaوالثاني هو وسط ذو ذرات متعادلة Neutral atomic gas والثالث وسط تغلب عليه الجزيئات Molecular gas. ففي الوسط الغازي نجد أن الطيف المستمر وخطوط طيف الذرات هي عبارة عن ناتج تفاعل بين المادة والإشعاع في الغلاف النجمي للنجوم الساخنة ، فنجد أن النجم الذي تبلغ طاقه سطحه فوق عشرة إلكترون فولت ، أي 24 ألف درجة مطلقة -ما يكافئ طول موجي مقداره ألف انجشتروم - تكون كل عناصر سطح النجم متأينة . ولا توجد أي روابط كيميائية لتكوين الجزيئات . وهذا لأن الروابط القوية للجزيئات مثل OH, N_2, CO, H_2 تتكسر في وسط طاقة قدرها 2.5 إلكترون فولت ، أي عند درجة حرارة قدرها 6000 درجة مطلقة . وتختلف درجة تأين كل عنصر عن الآخر باختلاف طاقة التأين. وعند درجة حرارة عشرة آلاف درجة مطلقة تكون أيونات كل من الكربون والأكسجين والنيتروجين هي أهم صورة لثلاثة عناصر في هذا الوسط . وتقل قيمة التأين حتى تصل درجة الحرارة إلي أقل من 3000 درجة مطلقة . وعند هذه الدرجة يكون الكربون والأكسجين والنيتروجين في حالة ذرية متعادلة وتكون خطوط طيف الجزيئات تصبح ذات أهمية في النجوم ذات السطح البارد .

وأسطح النجوم تعتريها بعض التغيرات الحرارية مثل التي تحدث لسطح الشمس من حدوث البقع السوداء. وهذه البقع ما هي إلا عبارة عن مناطق منخفضة في درجة حرارتها ناتج من وجود أنابيب من المجال المغناطيسي الصاعد من مركز النجم بالنسبة للمناطق المحيطة بها ، فنجد أن درجة حرارة سطح الشمس (منطقة الفوتوسفير) تبلغ حوالي 5800 درجة مطلقة تقريبا ، أما درجة حرارة البقعة الشمسية فتصل إلي 3500 درجة مطلقة. وبدراسة طيف المنطقة المرئية visible region وجد أن خطوط

جدول (3-2) : الجزيئات والأيونات المرصودة في النجوم

الجزيء المرصود في	الشمس	التقسيم الطيفي للنجوم			الجزيء المرصود في	الشمس	التقسيم الطيفي للنجوم		
		M	S	C			M	S	C
AlH	*	*	*	*	SiN		*		
AlO		*			SiO	*	*	*	
BO		*			SnH				*
CaH	*	*			TiH	*	*		
CaCl				*	TiO	*	*	*	
CeO			*		TiS				*
CrO		*			VO			*	*
CrH	*				YO			*	*
C_2	*			*	YS			*	
CH	*	*	*	*	ZnH				*
CN	*	*	*	*	ZrO	*	*	*	
CO	*	*	*	*	ZrS				*

*				C_2H	*				CS
*				C_2H_2	*				CuH
*				C_3		*	*	*	FeH
		*		CaOH	*				GeH
*				HCN	*	*	*	*	H_2
		*	*	H_2O	*	*	*	*	HF
*				SiC_2	*			*	HCl
		*		CH_4	*				LaO
*	*	*	*	H^-		*	*	*	MgH
			*	SiH^+		*			MgO
			*	CH	*		*	*	NH
*	*	*	*	SiH				*	NiH
		*		SiF		*	*	*	OH
						*	*	*	ScO

وتلك النجوم ذات درجات الحرارة المنخفضة منها ما يمكن رصده في الأطوال الموجيه الضوئيةOptical wavelengths ، بينما منها ما هو بارد شبه مظلم فيتم رصده في الأشعة فوق الحمراء Infrared والميكرويف Microwave . وعلي هذا فالطريقة **الثانية لتقسيم سطح النجوم** : تعتمد علي نسبة الكربون إلي الأكسجين في الوسط بالنسبة للنجوم التي يتم رصدها في الأطوال الموجيه الضوئية Optical wavelengths. فعندما تكون نسبة الكربون إلي الأكسجين أكبر من واحد تسمى هذه النجوم بالنجوم الكربونية Carbon Stars وتغلب عليها تفاعلات الكربون Carbon-bearing reactions و فيها يتحد معظم الأكسجين مع الكربون ليكون أول أكسيد الكربون CO والجزء الآخر من الكربون يتحول إلي C_2H_2 . والنيتروجين يوجد علي صورة HCN بينما الكبريت يوجد علي صورة SiS, CS, H_2S وكذلك وجود جسيمات صغيرة من الكربون. و تكون نسبة الكربون إلي الأكسجين أقل من واحد عند ذلك ، وهذا النوع يمثله النوع M للتقسيم الطيفي للنجوم ،

فعندما تكون درجة حرارة سطح النجم ما بين 4000 و3000 درجة مطلقة يتكون SiO وSiS بالتفاعلات الآتيه:

$Si + O \rightarrow SiO$
$Si + S \rightarrow SiS$

وعند درجة حرارة تتراوح من 3000 إلي 2500 درجة مطلقة نجد أول أكسيد الكربون CO ومجموعة الهيدروكسيل OH وجزيء النيتروجين N_2 في حالة استقرار. وهذه المركبات تكونت عن طريق تفاعل الذرات المتعادل مع بعضها neutral-neutral reaction علي النحو التالي:

$C + O \rightarrow CO$
$H + O \rightarrow OH$
$N + N \rightarrow N_2$

وعند درجة حرارة مقدارها ألفا درجةٍ مطلقة تقريباً تكون كل العناصر في حالة تعادل ذري. ويتفاعل الهيدروكسيل مع الهيدروجين ليكون جزيء الماء الغازي

$OH + H \rightarrow H_2O$

ويوجد معظم الكبريت في صورة SiS, SH وكميات قلية منه علي صورة SO, COS, CS

$Si + S \rightarrow SiS$

$S + H \rightarrow SH$
$S + O \rightarrow SO$
$S + C \rightarrow CS$
$CS + O \rightarrow COS$

وكذلك الألومنيوم يوجد علي صورة AlO

ويتكون الميثان CH_4 من تفاعل أول أكسيد الكربون مع ثلاث جزيئات من الهيدروجين عند درجة حرارة ما بين 1000 إلي 600 درجة مطلقة

$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$

وعندما تصل درجة حرارة البقعة السوداء ، في النجوم ذات الحرارة المنخفضة ، إلي عدة مئات يتفاعل جزيء النيتروجين مع ثلاث جزيئات من الهيدروجين ليكون الأمونيا

$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$.

وفي النهاية نقول إن سائر العناصر بما في ذلك ما يحتوي علية جسم الإنسان من كربون وما يشتمل عليه الهواء الذي نتنفسه من أكسجين قد أنتجت داخل النجوم وانتشرت عبر الفضاء علي أثر الانفجارات النجمية.

كيمياء النجوم المتفجرة
Chemistry of Stellar Supernova

ذكرنا سابقا أن السوبر نوفا تنشأ من موت النجوم العملاقة ذات الكتل الكبيرة. ومن حسن الحظ أنه في الربع الأخير من القرن العشرين ، وبالتحديد في يوم 23 من فبراير عام 1986 تم رصد إحدى هذه السوبر نوفا في سديم ماجلان الكبير ، الذي يرى في نصف الكرة الأرضية الجنوبي ، وسميت SN1986A .

وبتحليل الأرصاد لهذه السوبر نوفا استطاع الفلكيون رسم خريطة حياة هذا النجم المنفجر ، وكانت كالآتي : ولد هذا النجم منذ حوالي عشرة مليون سنه مضت ، وكانت كتلته آنذاك تعادل عشرين مرة كتلة الشمس ، ودرجة حرارة لبه كانت أربعين مليون درجة مطلقة. وكانت تبلغ قوة إشعاعه ستون ألف مرة مثل الشمس ، وكثافة المادة باللب خمسة جرام لكل سم^3 . وبعد 90% من عمره تحول الهيدروجين الموجود باللب إلى هليوم ، حيث باغت كتلة هذا اللب ستة أمثال كتلة الشمس ، وكثافته تسع مائة جرام لكل سم^3 ، ودرجة حرارة مائة وسبعون مليون درجة مطلقة. حيث بدأت تفاعلات الهليوم بتكوين الكربون ثم الأكسجين والتي استغرقت مليون سنه. وفي تلك الفترة تمدد النجم إلى ما يعادل المسافة بين الأرض والشمس كما زاد اللمعان إلى مائة ألف مرة لمعان الشمس ، وأصبح النجم عملاقاً أحمر ضخماً. وفي هذه العملية فقد النجم جزءا من مادته على شكل رياح نجمية. ثم بعد تلك المليون سنة توقفت التفاعلات داخل اللب مما أدى إلى انكماش النجم ليصبح عملاقاً أزرق لامعاً Blue super giant .

وعندما وصلت درجة حرارة اللب إلى سبع مائة مليون درجة مطلقة والكثافة إلى مائة ألف جرام لكل سم^3 بدأ تحول الكربون إلى نيون وصوديوم ومغنيسيوم. وهذا الطور استغرق ألف سنه فقط.بعد ذلك توقفت التفاعلات النووية التي تنتج النيون والصوديوم والمغنيسيوم ، مما أدى إلى انكماش النجم حتى وصلت الكثافة إلى عشرة أطنان لكل سم^3 وارتفعت درجة الحرارة إلى واحد ونصف بليون درجة مطلقة في لب النجم. وهذا الطور استمر عدة سنوات.

ومنذ حوالي سبعة عشر ألف سنه مضت انكمش النجم لتتفتت الذرات وتتفاعل الإلكترونات والبروتونات وتتكون نيوترونات تقبل الضغط لحدود الانحلال. وبعدها توقف الانكماش في لب النجم ليحدث صدمة عكسية كرد فعل على توقف الانكماش مما أدى إلى انفجار النجم. وهذا الطور أخذ عشرات الثواني فقط.

وكانت المادة المنطلقة في الفضاء من انفجار النجم من اللمعان مما جعلها رصدت في جميع الطوال الموجية التي تبدأ من أشعة جاما وتنتهي بالأشعة الراديوية. كما أنها النوفا الأولي التي تم رصد النيوترينو الخارج منها.

وبتحليل الأطياف المرصودة للمادة المنطلقة من النجم تم التعرف على طيف كل من الهيدروجين والأكسجين والكربون والسيليكون والحديد و الاسكانديوم-44 ، مع طيف النيكل-56 غير المستقر الذي يتحول إلي الكوبلت Co^{56} بخروج جسيمات بيتا وكمية طاقة قدرها 10^{49} أرج في الثانية. ولقد وجد أن فترة عمر النصف للنيكل-56 تبلغ ستة أيام ليكون الكوبلت Co^{56} ، ويتحلل بعدها الكوبلت Co^{56} إلى حديد-56 في فترة عمر نصف قدرها 77 يوما وخروج أشعة جاما وبوزيترونات.

وكانت مفاجأة هذه النوفا للبشرية هي رصد أول أكسيد الكربون CO وأيونة CO^+ وأكسيد السيليكون SiO والهيدرونيوم OH في المادة المنطلقة من النجم بعد الانفجار.

وحيث إن الخواص الفيزيائية للمادة المنطلقة من عملية الانفجار تختلف عن التي توجد في مادة ما بين النجوم (سوف نذكرها في الباب القادم) لهذا فإن عملية تكوين وتكسير الجزيئات في تلك المادة تتبع ظروف مخالفة عن مادة ما بين النجوم. فنجد أن كثافة المادة بعد مائة يوم من الانفجار بلغت 10^{11} سم$^{-3}$ ، ودرجة الحرارة بلغت عدة آلاف من الدرجات المطلقة. وبعد 400 يوم من الانفجار تصبح المادة عبارة عن هيدروجين وعناصر ثقيلة وحبات تراب كوني grains .

ولقد تم رصد أول أكسيد الكربون وأيونه أول مرة في تلك المادة عندما كانت الكثافة 10^{11} سم$^{-3}$ ، حيث تكون بعدة طرق : أولها عن طريق تصادم ثلاث ذرات مع بعضها

$C + O + He \rightarrow CO + He$

والثانية عن طريق الاتحاد الإشعاعي بين أيون الكربون وذرة الأكسجين

$C^+ + O \rightarrow CO^+ + photon$ (طاقة)

ثم يتبع هذا تفاعل CO^+ مع الأكسجين لينتج CO

$CO^+ + O \rightarrow CO + O^+$.

وكمية تركيز CO الناتجة من هذا التفاعل قليلة لأن معدل معامل تفاعل C^+ مع الأكسجين ضعيف ، حيث تبلغ 10^{-18}سم^3 في الثانية.

والطريقة الثالثة لتكوين أول أكسيد الكربون تتم بتفاعل أيون سالب الأكسجين مع الكربون

$O^- + C \rightarrow CO + e$

وكمية تركيز أول أكسيد الكربون المتكون بهذه الطريقة كبيرة ، لأن معدل تفاعل الكربون مع أيون سالب الأكسجين تبلغ 10^{-17} سم^3 في الثانية.

أما الطريقة الرابعة لتكوين أول أكسيد الكربون فتبدأ بتفاعل الأكسجين مع الإلكترونات

$O + e \rightarrow O^- + photon$ (طاقة)

ليكون أيون سالب الأكسجين ، بمعدل تفاعل قدره حوالي 10^{-15} سم^3 في الثانية. ويتبع ذلك تفاعل أيون سالب الأكسجين مع الكربون ليكون جزئ الأكسجين

$O^- + O \rightarrow O_2 + e$

الذي يتفاعل مع الكربون ليكون CO

$O^2 + C \rightarrow CO + O$.

وبجانب تفاعل أيون سالب الأكسجين مع الكربون والأكسجين المتعادل ، ونظرا لشدة تركيز الفوتونات في هذه المرحلة داخل المادة المنطلقة ، فإن أيون سالب الأكسجين يتحول إلى أكسوجين عن طريق التفاعل التالي

$O^- + photon \rightarrow O + e$.

ويتحول أيضا إلى أكسوجين عن طريق تفاعله مع أيون الهليوم

$O^- + He^+ \rightarrow O + He$.

ومن المعلوم أن طاقة تكسير أول أكسيد الكربون تبلغ 11.09 إلكترون فولت ، وهذا يعني أنه يتكسر في هذه المرحلة عن طريق تصادمه مع الإلكترونات والفوتونات وذرة الهليوم

$CO + e \rightarrow C + O + e$ أو $CO^{+} + e + e$

$CO + photon \rightarrow C + O$ أو $CO^{+} + e$

$CO + He \rightarrow C + O + He.$

وعندما تبرد المادة المنطلقة إلى أقل من خمسة آلاف درجة مطلقة فإن CO يتكسر كيميائيا عن طريق تفاعله مع أيون الهليوم

$CO + He^{+} \rightarrow C^{+} + O + He.$

وبالطبع فقد تم رصد خط طيف جزئ الهيدروجين في تلك المادة المنطلقة ، الذي تكون في هذا الوسط بطريقتين : الأولى عن طريق تفاعل الهيدروجين مع الإلكترونات ليتكون أيون سالب الهيدروجين

$e + H \rightarrow H^{-} + photon$ (طاقة)

الذي يتفاعل مع الهيدروجين مرة أخرى ليكون جزئ الهيدروجين

$H^{-} + H \rightarrow H_2 + e.$

وهذه الطريقة تعتبر غير ذات أهمية لأن كمية تركيز أيون سالب الهيدروجين تنقص بشدة عن طريق عملية تحوله إلى هيدروجين. وكذلك لاعتمادها على مقدار تركيز الفوتونات في الوسط ، التي تنتج الإلكترونات ، والتي تقل مع مرور الزمن وابتعاد المادة المنطلقة عن النجم.

والطريقة الثانية لتكوين H_2 فتبدأ بتفاعل أيون الهليوم مع الهيدروجين

$He^{+} + H \rightarrow HeH^{+} + photon$

$HeH^{+} + H \rightarrow H_2^{+} + He$

$H_2^{+} + H \rightarrow H_2 + H^{+}.$

وبتكون جزئ الهيدروجين في الوسط يتكون الهيدرونيوم OH عن طريق تفاعله مع الأكسجين

$H_2 + O \rightarrow OH + H.$

وبعد حوالي مائة يوم من الانفجار تم رصد خط طيف انبعاثي ضعيف عند الطول الموجي 3.41 و 3.53 ميكرو متر ، وكانت أكبر شدة له في يوم 192 من الانفجار ، ثم أخذ بعد ذلك في الضعف. وبمقارنة هذا الطيف مع الأطياف المعملية وجد إنه لأيون ثلاثي ذرات الهيدروجين H_3^{+}

.

وفي هذه المرحلة من الانفجار تكون H_3^+ من تفاعل الهيدروجين المثار مع جزئ الهيدروجين

$H^* + H_2 \rightarrow H_3^+ + e$

بعد مائة وستون يوما من الانفجار تم رصد طيف إشعاع أكسيد السيليكون SiO في طول موجي تحت الأحمر قدرة 10.8 ميكرو متر . وبعد 578 يوم من الانفجار اختفى طيف إشعاع SiO ، مما يعني أنة تكثف على سطح حبات الغبار ، حيث بلغت درجة الحرارة إلي أقل من ألف درجة مطلقة.

وبواسطة تفاعل الطور الغازي gas phase تكون أكسيد السيليكون حتى 530 يوما من رصده. وهذا التكوين بدأ بواسطة تفاعل الاتحاد الإشعاعي المباشر بين الأكسجين والسيليكون

$Si + O \rightarrow SiO + photon.$

أو عن طريق تفاعل الأكسجين مع أيون السيليكون

$Si^+ + O \rightarrow SiO^+ + photon$

الذي تبع بتفاعل انتقال الشحنة مع العناصر الثقيلة مثل الماغنسيوم والحديد

$SiO^+ + Mg \rightarrow SiO + Mg^+$

$SiO^+ + Fe \rightarrow SiO + Fe^+.$

والطريقة قبل الأخيرة التي تكون بها أكسيد السيليكون هي تفاعل ذرتي الأكسجين ليتكون جزئ الأكسجين

$O + O \rightarrow O_2 + photon$

الذي يتفاعل بدورة مع السيليكون ليكون SiO

$Si + O_2 \rightarrow SiO + O.$

والأيونات السالبة لعبت دورا في تكوين SiO ، حيث تصادمت الإلكترونات مع السيليكون والأكسجين لتكون أيون سالب كل منهما

$e + Si \rightarrow Si^- + photon$

$e + O \rightarrow O^- + photon$

اللذين بدورهما تفاعلا مع الأكسجين والسيليكون عن طريق تفاعل الاتحاد الإشعاعي ليكونا SiO

$Si^- + O \rightarrow SiO + e$

$O^- + Si \rightarrow SiO + e$

وتكسر SiO بعدة طرق : أولها تصادمه مع الإلكترونات

$SiO + e \rightarrow SiO^+ + e + e$

$SiO + e \rightarrow Si + O + e$

$SiO + e \rightarrow Si^+ + e + e + O$

$SiO + e \rightarrow Si + O^{+} + e + e.$

والثانية عن طريق تفاعل انتقال الشحنة مع أيون الكربون

$SiO + C^{+} \rightarrow SiO^{+} + C$
$SiO + C^{+} \rightarrow Si^{+} + CO$
$SiO + C^{+} \rightarrow SiC^{+} + O.$

والثالثة عن طريق التكسير والتأين الضوئي photo dissociation and photo ionization

$SiO + photon \rightarrow Si + O$
$SiO + photon \rightarrow SiO^{+} + e.$

وأخيرا عن طريق تفاعله مع أيون الهليوم

$SiO + He^{+} \rightarrow Si^{+} + O + He.$

تطبيقات Applications

من دراسة كيمياء العناصر والجزيئات السابقة في هذا الوسط شديد التعقيد من الناحية الفيزيائية يمكن فهم تركيب وتطور الأطوار المختلفة للنجم . وهناك طريقتان لدراسة الخواص الفيزيائية : **أولها** فرض أن النجوم ثابتة في السماء. وفي هذه الحالة يمكن قياس الخواص التالية :

1- بعد تحديد اللون الذي يشع بقوة من الألوان الأخرى في النجم ، ثم باستخدام قانون فين ، يمكن تحديد درجة الحرارة الفعالة لسطح النجم. ودرجة الحرارة الفعالة تمثل متوسط درجة الحرارة الأكثر فعالية على سطح النجم ، بالمقارنة مع المناطق الأخرى من النجم الأبرد والأسخن.

وقانون فين ينص على أن حاصل ضرب طول الموجة المشعة بالمتر λ في درجة الحرارة T يساوي كمية ثابتة قدرها 0.0029 .

$\lambda \times T = 0.0029$

2- بعد معرفة درجة حرارة النجم وكمية الطاقة التي تشع يمكن قياس قطر النجم باستخدام قانون ستيفان و بولتزمان. فالقانون ينص على:

$E = RxSxT^4$

حيث E هي الطاقة المنبعثة من كل سنتمتر من سطح النجم خلال كل ثانية

و R هي ثابت ستيفان و بولتزمان و S هي مساحة سطح النجم و T هي

درجة حرارة النجم.

وهذا يعني أن النجم الذي يشع كمية معينة من الطاقة ، وله درجة حرارة

معروفة ، له سطح محدد. وبالتطبيق البسيط لقانون مساحة الكرة يمكن

استنتاج قطر النجم.

3- يمكن معرفة عدد الذرات الموجودة في النجم ، بدراسة خطوط الامتصاص

من حيث الاتساع وشدة الظلمة .

4- يمكن معرفة الظروف الفيزيائية للوسط المحيط بالنجم ، بدراسة خطوط

الانبعاث من حيث الاتساع وشدة السطوع.

5- يمكن تحديد شدة المجالات المغنطيسية للنجوم ، باستخدام نظرية زيمان ، التي تنص على أن خطوط الامتصاص والانبعاث تنقسم إلى خطوط جزئية متقاربة بسبب وجود المجال المغناطيسي ، وكلما كان المجال أقوى ،كان الانقسام أكبر.

أما الطريقة **الثانية** لدراسة الخواص الفيزيائية للنجم هي الأخذ في الاعتبار حركة النجم أو التي تحدث على سطحه ، باستخدام ظاهرة دوبلر للإزاحة في طول الموجة المقابل لخط الانبعاث أو الامتصاص التي تحدث بسبب الحركة النسبية بين المصدر المشع والمستقبل للضوء. وتعطى هذه الإزاحة بالعلاقة الآتية :

$\Delta\lambda = (\lambda - \lambda_0) = V \lambda / C$

حيث $\Delta\lambda$ هي الفرق في الطول الموجي ،و λ الطول الموجي بعد الإزاحة ، و λ_0 الطول الموجي الطبيعي ، و V هي سرعة المصدر الضوئي ، و C سرعة الضوء. فإذا كانت $\Delta\lambda$ سالبة فهذا يعني أن المصدر الضوئي يقترب

ومن الخواص الفيزيائية التي يمكن قياسها مباشرة من دراسة الأطوال الموجيه للمركبات والعناصر الكيميائية باستخدام ظاهره دوبلر ، هي

1- درجة الحرارة لسطح النجم باستخدام المعادلة الآتية:

$$\Delta\lambda = (1.67\, \lambda_0 / C)x(2kT/m)^{0.5}$$

حيث k هو ثابت بولتزمان و m هي كتلة الذرات التي تم رصد خط الطيف لها.

2- السرعة الخطية للنجوم (حركة النجم في اتجاه خط البصر) بإيجاد قيمة V في معادلة الإزاحة السابقة.

الهوامش

1- مجدي يوسف أمين " **انكماش سحابة بين نجمية ممغنطة** " 1994 رسالة دكتوراه جامعة القاهرة

2- عبد القوي زكي عياد " **الموسوعة الفلكية** " الهيئة المصرية العامة للكتاب 1990

3- محمد صالح النواوي " **الفلك** " مطبوعات جامعة الإمارات 1997

4- Kenneth R. Lang " **Astrophysical Formulae** " Second corrected and enlarged edition 1980. Published by Springer – Verlag Berlin Heidelberg.

5- Uffe Grae Jorgensen " **Cool Stars Model** " . E.F. van Dishoeck (ed.), Molecules in Astrophysics : Probes and Processes. 1997 IAU No. 178

6- H. Karthunen, P. Kroger, H.Oja, and M.Poutanen, K. "**Fundamental Astronomy** " 1994. . J.Dumer (eds). Springer-Verlag

7- A. Dalgarno " **Molecular Astrophysics** " 1985 .ed. G.H.F. Diercksen , W.F. Huebner and P.W. Langhoff. (Reidel) P. 218

-8 W.W. Duley and D.A. Williams " **Interstellar Chemistry** " 1984. Academic Press Inc. (London) LTD

-9 T. Tsuji " **Molecular abundances in stellar atmosphere II** " Astronomy and astrophysics, 1973. Vol.23, p. 411

-10 Abell Morrison Wolff " **Exploration of the Universe** " sixth edition . Saunders College Publishing

-11 Ostti A. and Carrd B.W. " **An introduction to modern stellar astrophysics** " 1996. Addison wesly company

-12 John,S. Lewis 1995. " **physics and chemistry of the solar system**". Academic press INC

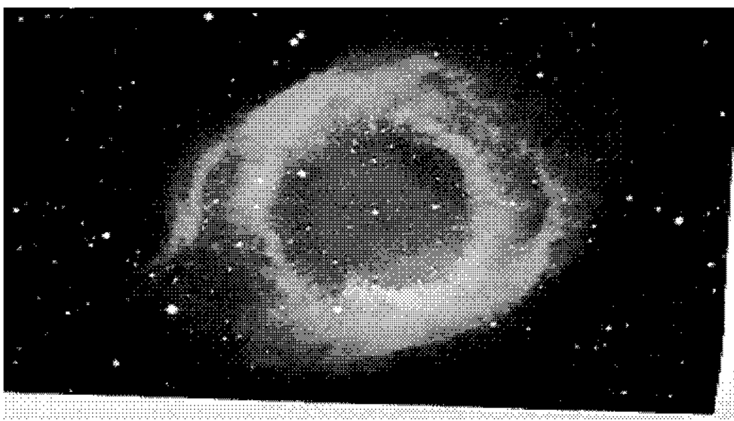
-13 Greenberg J.M. and Pirronello,V. 1991. " **Chemistry in space**". Series C : Mathematical and physical Science – vol 323. NATO ASI Series. Kluwer academic publisher.

-14 Min Yan and A. Dalgarno " **H_3^+ emission in the ejecta of SN 1987A"** 1998. The astrophysical journal, vol.500, p1049.

كيمياء مادة ما بين النجوم
Chemistry of Interstellar Medium

مادة ما بين النجوم Interatellar Matter

إن الفضاء يمتد امتدادا شاسعا ، والكواكب والنجوم والمجرات إنما هي جزء ضئيل من الحجم الكلى للكون. والمسافات ما بين هذه الأجرام يشار إليها بمسافات ، ما بين الكواكب ، و، ما بين النجوم ، و ، ما بين المجرات ،علي الترتيب . ولكن أيا منها ليس خاويا. فمنذ بداية القرن العشرين تأكد الفلكيون أن الفراغ الضخم بين النجوم داخل المجرة يمتلئ بمادة غازية تسمى مادة ما بين النجوم. ومادة ما بين النجوم تم اكتشافها في عام 1904 عندما لاحظ العالم الهولندي هارثمان الذي كان يدرس طيف أحد المزدوجات النجمية الطيفية في منطقة الجبار ذو الخطوط الطيفية العريضة وجود نوع من الخطوط الطيفية الضعيفة لكنها في نفس الوقت حادة الملامح ، وبعد تحليل هذا الطيف وجد أنه لذرة الكالسيوم المتأينة ولذرة الصوديوم. وفى عام 1922 لاحظ هيجر Heger وجود خطوط طيف لعناصر كيميائية معقدة. وقد تم اكتشاف أول ثلاث مركبات كيميائية في مادة ما بين النجوم وهم الميثيلدين Methylidyne (CH) و أيون الميثيلدين Methylidyne ion (CH^+) و السيانوجين Cyanogen (CN) بعد ذلك بين عامي 1937-1941. ففي دراسة السحابة البين نجمية الموجودة في كوكبة حامل الأفعى القريبة من النجم زيتا أوفيوشي ذي الحرارة العالية عام 1941 تم رصد خط طيف امتصاص عند طول موجي قدره 3875 أنجستروم ، وهذا يشير إلي أنه يوجد في هذه السحابة جزيئات السيانوجين المستقر.وهذا يعني أن جزيئات السيانوجين CN في الفضاء تكون أكثر استقرارا من الحالة العادية علي سطح الأرض ، لأنه علي سطح الأرض سرعان ما يكون روابط كيميائية أكثر استقرارا مثل حمض سيانور الماء HCN . وبإعادة دراسة هذا الخط وجد أنه مشطور إلي خطوط ، وأنة يتألف من ثلاث مركبات أطوال موجاتها 3874.608 و 3875.763و 3873.998 أنجستروم. وتفسير هذا يعني أن أول واحد بين أطوال موجات الامتصاص هذه يرجع إلي انتقال السيانوجين من أقل مستوى للطاقة (الحالة الأساسية) إلي الحالة الاهتزازية. وهذا الانتقال لابد أن يتم حتى ولو كان السيانوجين في درجة حرارة مساوية للصفر المطلق. بينما الخطان الآخران لا يمكن أن يحدثا إلا بانتقالات يمر فيها السيانوجين من حالة دوران طاقتها أعلي



سديم حلزوني يسمى NGC7293 داخل مجرتنا على بعد 125 بارسك من الشمس. اللون الأخضر ناشئ من ذرات الأكسجين المتأينة ، بينما اللون الأحمر ناشئ من عناصر الهيدروجين والنيتروجين

ثم عام 1951 بواسطة المناظير الراديويه تم رصد طيف الهيدروجين المتعادل Neutral Hydrogen - المكون الرئيسي للكون - ، برغم سبق توقع وجوده نظريا قبل ذلك بكثير. فقد بدا منطقيا ضرورة وجود كميات كبيرة من الهيدروجين في الفضاء ، وذلك لأن الهيدروجين هو أكثر العناصر شيوعا في الكون وأحد المكونات الأساسية للنجوم. إلا أنه لم تكن هناك طريقة لاكتشافه حتى ظهور المناظير الراديويه. والهيدروجين

ولتوضيح هذه الظروف ، نذكر أنه من المعروف أن ذرة الهيدروجين المتعادلة تتكون من بروتون واحد يدور حوله إلكترون واحد. والإلكترون الذي يدور علي مسافة كبيرة من النواة له طاقة أكبر عن الذي يدور قريبا منها. وعندما ينتقل الإلكترون من مدار اكبر في الطاقة إلي آخر أصغر في الطاقة ينبعث فرق الطاقة علي هيئة فوتون ضوئي. وأقل مدار ممكن يسمى بحالة أو مستوى الخمود Ground State، وهذا المستوى يتكون من مدارين مختلفين في طاقتهما بقدر بسيط أعلاهما طاقة يوجد في وضع أعلي بعض الشيء . ويدور البروتون الذي تتكون منه النواة حول محوره ويصاحب هذا الدوران مجال مغناطيسي صغير عمودي علي مستوي مدار الإلكترون. كما يدور الإلكترون أيضا حول محوره مصطحبا بمجال مغناطيسي خاص. وهذا المجال عمودي أيضا علي مستوي مدار الإلكترون. أما كون مجالا البروتون والإلكترون لهما نفس الاتجاه أم أنهما متضادين تماما ، فيأتي من اتجاه دوران الإلكترون حول البروتون مع عقارب الساعة أو ضدها. كما أن الاتجاه الذي يدور فيه الإلكترون يتحدد بدوره بمعلومية مستوي الخمود الذي يحتله الإلكترون. فإذا كان الإلكترون موجود في مستوي الطاقة الأعلى قليلا ، فأنه يدور في أحد الاتجاهين، وإذا كان في المستوي الأقل قليلا يدور في الاتجاه الآخر.

ومن قوانين الكم تتم الانتقالات من تلقاء نفسها ، فيتحرك فيها الإلكترون في مستوي الخمود من مدار أعلي طاقة إلي آخر أقل طاقة . عندما يحدث ذلك يغير الإلكترون من اتجاه دورانه وينطلق فوتون ضوئي منخفض الطاقة ، يناظر طول موجي 21 سم. وهذا الانتقال يحدث في المتوسط في ذرة بذاتها مرة كل إحدى عشر مليون سنه. وهذا لا يعني أن يتم ذلك كل إحدى عشر مليون سنه ، وإنما ذلك في المتوسط فقط ، فقد لا ينتقل الإلكترون إطلاقا في ذرة ما بينما يتم الانتقال في ذرة أخري عدة

ونظرا لأن سحب الغاز متحركة فإن ظاهرة دوبلر تلعب دورا في إشعاع الطول الموجي 21 سم ، بحيث يأتينا على شكل شريط يضم الموجات القريبة من هذا الطول. فإذا كان الهيدروجين مبتعدا عنا فان طول الموجة يبدو أطول قليلا ، أما إذا كان مقتربا فإنها تظهر أقصر بدرجة أقل . لهذا فإن الطول الموجي 21 سم لا يمكننا فقط من اكتشاف سحابة الهيدروجين بل أيضا تحديد سرعتها والاتجاه الذي تتحرك فيه.

وظاهرة دوبلر هي تغيير ذبذبة الموجات الإشعاعية والناتج عن الحركة أو السرعة النسبية بين المشاهد ومنبع الإشعاع. فإذا ما كان المنبع مقتربا شاهد الراصد ذبذبات أعلى عما يتم إشعاعه بالفعل. الأمر الذي يؤدي إلى إزاحة الضوء في اتجاه الناحية الزرقاء من الطيف. أما إذا كان المصدر مبتعدا عن المشاهد فإن الأخير يستقبل موجات منخفضة في ذبذبتها عما يتم إشعاعه بالفعل ، الأمر الذي يعني إزاحة حمراء.

ويمكن رؤية سحب الغاز المختلطة بالغبار بصريا ، في حين لم تكن هناك طريقة للاستدلال على السحب الخالية من الغبار ، أو التي تحتوي علي كمية قليلة منه إلا بعد إدخال المناظير الراديويه واكتشاف الطول الموجي 21 سم. ويرجع السبب في ذلك إلي أن سحب الغبار والغاز لا تشتت ولا تمتص الطول الموجي 21 سم أو الذبذبات الأطول منة بنفس القدر الذي تؤثر به علي الضوء المرئي.

ومنذ عام 1969 ميلادية تم اكتشاف الجزيئات العضوية في سحب مادة ما بين النجوم.ففي نهاية عام 1968 ميلادية تمكنت مجموعة أمريكية بقيادة س.هـ. تاونسي من اكتشاف خطوط طيفية راديويه عند الأطوال الموجية 1.25سم و 1.35سم لكل من الأمونيا Ammonia (NH_3) والماء Water (H_2O). وفي عام 1969 ميلادية تمكنت مجموعة أخري من اكتشاف خط الطيف عند الطول الموجي 6.2 سم الدال علي وجود الفورمالدهيد Formaldehyde (H_2CO). ثم تلي بعد ذلك اكتشاف مركبات جديدة مثل الكحول

وبعد تطور المناظير الراديوية في عام 1970 ميلادية إلي الآن تم كشف طيف أكثر من 147 عنصر ومركب كيميائي حتى الآن في السحب البين نجمية والمادة المحيطة بالنجوم Circumstellar وهي الموضحة بالجدول (4-1) .

جدول (4-1) : العناصر والمركبات الكيميائية التي تم رصدها في مادة ما بين النجوم.

الرمز	الجزيء باللغة الانجليزية	الجزيء باللغة العربية	الطول الموجي المستخدم في الرصد
H_2	Hydrogen molecule	جزيء الهيدروجين	UV, IR
CO	Carbon monoxide	أول أكسيد الكربون	UV, IR
CO^+	Carbon monoxide ion	أيون أول أكسيد الكربون	UV, IR
CH	Methylidyne	الميثيالدين	Radio, optical, IR
OH	Hydroxyl radical	هيدروكسيل	UV, IR, radio
CH^+	Methylidyne ion	أيون الميثيالدين	Optical
C_2	Diatomic carbon	جزيء كربون	Optical
CN	Cyanogen radical	سيانوجين	Optical, radio
CS	Carbon monosulfide	أول كبرتيد الكربون	IR, radio
NO	Nitric oxide	أكسيد النيتروجين	Radio
NS	Nitrogen sulfide	كبرتيد النيتروجين	Radio
NH	Nitrogen hydride	هيدرايد النيتروجين	Radio

SO^+	Sulfoxide ion	أيـــون أول أكـــسيد الكبريت	Radio
SO	Sulfur monoxide	أول أكسيد الكبريت	Radio
SiO	Silicon monoxide	أكسيد السيليكون	IR, radio
SiC	Silicon carbide	كبرتيد السيليكون	Radio
SiN	Silicon nitride	نيتريد السيليكون	Radio
SiS	Silicon sulfide	كبرتيد السيليكون	Radio
CP	Phosphorus carbide	كربيد الفسفور	Radio
AlCl	Aluminum chloride	كلوريد الألومنيوم	Radio
NaCl	Sodium chloride	كلوريد الصوديوم	Radio
KCl	Potassium chloride	أحـــادي كلوريـــد البوتاسيوم	Radio
HCl	Hydrogen chloride	كلوريد الهيدروجين	Sub
PN	Phosphorus nitride	نيتريد الفوسفور	Radio
AlF	Aluminum fluoride	فلوريد الألومنيوم	Radio
	3 atoms		
HCN	Hydrogen cyanide	سيانيد الهيدروجين	IR, radio
HNC	Hydrogen isocyanide	أيـــزو ســـيانيد الهيدروجين	Radio
HNO	Nitroxyl	نيتروكسيل	Radio
H_2O	Water	الماء	Radio
CCH	Ethynyl radical	إيثيلين	Radio
HCO	Formyl radical	حامض الفورميل	Radio
HCO^+	Formyl ion	أيـــون حـــامض الفورميل	Radio
HOC^+	Isoformyl ion	نظيـر أيـون حـامض الفورميل	Radio
OCS	Carbonyl sulfide	كبرتيد الكربونيل	Radio
H_2S	Hydrogen sulfide	كبرتيد الهيدروجين	Radio
C_2O	Dicarbon monoxide	ثنـــائي أول أكـــسيد الكربون	Radio
CH_2	Methylene	الميثيلين	Radio
C_2S	Dicarbon sulfide	ثنـــائي أول كبرتيـــد الكربون	Radio

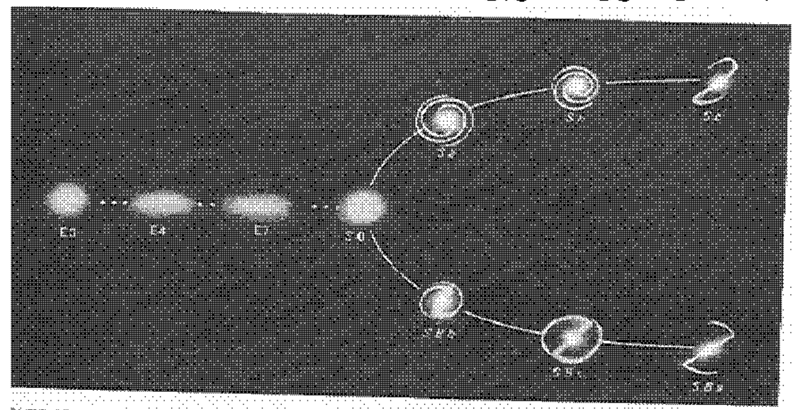
C_3	Triatomic carbon	كربون ثلاثي الذرات	Radio
SO_2	Sulfur dioxide	ثاني أكسيد الكبريت	Radio
SiC_2	Silicon dicarbide	ثنائي كربون السيليكون	Radio
N_2H^+	Protonated nitrogen	جزيء نيتروجين محمل بالبرتون	Radio
NH_2	Amidogen	أميدجون	Radio
HCS^+	Thioformyl ion	أيون حامض كبرتيد النمليك	Radio
H_2D^+	Hydrogen deuterate ion	أيون هيدرونيم الهيدروجين	Sub
NaNC	Sodium isocyanide	نظير سيانيد الصوديوم	Radio
MgCN	Magnesium cyanide	سيانيد الماغنسيوم	Radio
MgNC	Magnesium isocyanide	نظير سيانيد الماغنسيوم	Radio
N_2O	Nitrous oxide	الأكسيد النتري	Radio
DCN	Hydrogen cyanide	سيانيد الهيدروجين	Radio
	4 atoms		
NH_3	Ammonia	الأمونيا=النشادر	IR, Radio
H_2CO	Formaldehyde	الفورمالديهايد	Radio
HCCH	Acetylene	أسيتيلين	IR
H_2CS	Thioformaldehyde	كبرتيد الفورمالديهايد	Radio
HNCO	Isocyanic acid	حامض ايزوسيانيد	Radio
HNCS	Thioisocyanic acid	نظير حامض كبرتيد السيانيك	Radio
C_3N	Cyanoethynyl radical	سيانو إثينيل	Radio
C_3H	Propynyl radical	بروبينيل	Radio
C_3O	Tricarbon monoxide	أول أكسيد ثلاثي الكربون	Radio
$HOCO^+$	Protonated carbon dioxide	ثاني اكسيد الكربون محمل بالبرتون	Radio
$HCNH^+$	Protonated hydrogen cyan- ide	سيانيد الهيدروجين محمل بالبرتون	Radio
H_3O^+	Hydronium ion	أيون الهيدرونيوم	Radio
H_2CN			Radio

HCCN			Radio
C_3S	Tricarbon sulphide	ثلاثـــي كبرتيـــد الكربون	Radio
	5 atoms		
CH_4	Methane	الميثان	IR
HC_3N	Cyanoacetylene	سيانو أسيتيلين	Radio
HCCNC	Isocyanoacetylene	نظير سيانو أسيتيلين	Radio
HCOOH	Formic acid	حمض النمليك	Radio
H_2CCO	Ketene	كتين	Radio
NH_2CN	Cyanamide	سياناميد	Radio
CH_2NH	Methanimine	ميثاني أمين	Radio
C_4H	Butadiynyl radical	بيوتادينيل	Radio
SiH_4	Silane	سيلان	IR
C_4Si	Silicon tetra	رابع كربيد السيليكون	Radio
C_3H_2	Cyclopropenylidene	بروبنيلدن الحلقي	Radio
H_2CCC	Propadienylidene	بروبنيلدن	Radio
CH_2CN	Cyanomethyl	سيانو ميثيل	Radio
C_5	Pentatomic carbon	خمسة ذرات كربون	Radio
	6 atoms		
CH_3OH	Methanol	الميثانول	Radio
CH_3CN	Acetonitrile	أسيتونيتريل	Radio
CH_3NC	methyl isocyanide	سيانيد الميثيل	Radio
CH_3SH	Methyl mercaptan	ميثيل المركبتان	Radio
CH_3CH	Methyl Methylidyne	ميثيل الميثيلدين	Radio
C_2H_4	Ethylene	الإثيلين	IR
H_2CCCC	Butatrienylidene		Radio
NH_2HCO	Formamide	فورماميد	Radio
C_5H	Pentynylidyne radical		Radio
C_5O	Pentacarbon monoxide	خماســي أول أكــسيد الكربون	Radio
HC_3NH^+			Radio
HC_3HO	Propynal	بروبينال	Radio
	7 atoms		
CH_3CCH	Methyl acetylene	ميثيل أستيلين	Radio
CH_3CHO	Acetaldehyde	أستالدهيد	Radio
CH_2CHCN	Vinyl cyanide	فينيل سيانيد	Radio

CH_3NH_2	Methylamine	ميثيل أمين	Radio
HC_5N	Cyanobutadiyne	سيانو بيوتادين	Radio
C_6H	Hexatriyl radical	سداسي الترايينيل	Radio
HC_5N	Cyanodiacetylene	سيانو ديثيلين	Radio
8 atoms			
CH_3C_3N	Methylcyanoacetylene	ميثيل سيانو أستيلين	Radio
$HCOOCH_3$	Methyl formate	ميثل فورمات	Radio
9 atoms			
CH_3CH_2OH	Ethanol	أيثانول	Radio
CH_3CH_2CN	Ethyl cyanide	إثيل سيانيد	Radio
CH_3OCH_3	Dimethyl ether	ثنائي ميثيل الإيثر	Radio
CH_3C_4H	Methyl diacetylene	ميثيل ثنائي أستيلين	Radio
HC_7N	Cyanohexatriyne	سيانو سداسي الترينيل	Radio
10 atoms			
CH_3COCH_3	Acetone	أسيتون	Radio
CH_3C_4CN	Methylcyano butdiyne		Radio
11-13 atoms			
HC_9N	Cyanooctatetrayne	سيانو ثماني تيتراين	Radio
$HC_{11}N$	Cyanodecapentayne	سيانو عشرة بينتاين	Radio

ولقد أصبحت دراسة هذه المادة من الناحية الفيزيائية والكيميائية أحد دعائم علم الفيزياء والكيمياء الفلكية الحديثة.وفي بادئ الأمر تركزت الدراسة علي خطوط الامتصاص القادمة من سحب ما بين النجوم الكثيفة ، التي لا تحجب كليّاً الضوء القادم من النجوم الواقعة خلف تلك السحب ، وتلك الخطوط تنتج عن الانتقال الإلكتروني Electronic Transitions داخل الذرات والجزيئات. وهذه الخطوط تري كخطوط حادة متراكبة علي الطيف النجمي Stellar Spectra في مناطق الطيف المرئي Visible wave Length ومنطقة الأشعة الفوق بنفسجية Ultra violet . وقد تبين أن هذه المادة تلعب دورا مهما في الاتزان الحراري داخل المجرة وعملية تكوين النجوم. ففي داخل المجرة ، النجوم تتكون بواسطة انكماش السحب الغازية ، وهذه

و تختلف المجرات عن بعضها اختلافا بينا حسب أشكالها الخارجية ، فمنها الكروي والحلزوني و البيضاوي وغير المنتظم في شكله العام. والشكل (4-1) يوضح تبويبا اقترحه العالم الأمريكي هابل في بداية الثلاثينات من القرن العشرين.



شكل (4-1) تخطيط هابل للمجرات

ويوضح هذا الشكل توزيع المجرات حسب أشكالها الخارجية في صورة شوكة رنانة. و توزع فيه المجرات في ثلاثة أنواع رئيسية تمثل العائلة الأولي عائلة المجرات البيضاويه ، و تتراوح أشكالها بين كروي تماما إلي بيضاوي زاد فيه التفلطح ، ويرمز لهذه العائلة بالرمز E وتتدرج من كروي تماما E_0 حتى المفلطح جدا E_6 . وبعدها تتفرع الشوكة إلي فرعيها ، والفرع الأعلى فيها يمثل عائلة المجرات الحلزونية العادية ، وهذه تنقسم إلي ثلاثة أنواع Sa, Sb, Sc وتختلف فيما بينها حسب حجم النواة وانفتاح الأذرع أو انغلاقها حول النواة. والعائلة الثانية التي يمثلها فرع الشوكة الأسفل تمثل العائلة الحلزونية ذات قضيب مادي يخرج من النواة وتتفرع منة الأذرع ، ويرمز لها بالرمز SBa, SBb,SBc.

وتبدأ مادة ما بين النجوم في الظهور ببساطة في النوع Sa ، ذي النواة الصغيرة والأذرع البسيطة ، وتزداد كتلة وتعقيدا في التركيب

وفى هذه السحب تتفاعل ذرات الهيدروجين والأكسجين والكربون والنيتروجين والكبريت لتكون جزيئات الماء وأول أكسيد الكربون والأمونيا وكبرتييد الهيدروجين وغيرها من الجزيئات العضوية .بل توجد أيضا جزيئات معقدة مثل كحول الإثيل .

وفي مادة ما بين النجوم ، مناطق ذات كثافة بسيطة يمكن أن تظهر في صورة مضيئة أو غير مضيئة، ويعتمد ذلك على النوع الطيفي لما يجاورها من نجوم. وتتكون هذه المادة من جزء غازي Gas phase وآخر ترابي (غبار) Cosmic Dust . والجزء الغازي يتكون من ذرات منفصلة وجزيئات وأيونات وإلكترونات طليقة. والجزء الأكبر من الغاز عبارة عن غاز هيدروجين الذي يوجد مختلطا مع الهليوم بنسبة 1/5 إلى 1/10 ، أما العناصر الأخرى فهي أقل ندرة من ذلك بكثير. وتبلغ كثافة غاز ما بين النجوم حوالي ذرة هيدروجين لكل سم^3 . والغاز متجمع أساسا في سحب ، ذات خواص مختلفة ، يبلغ قطر كل منها من 5 إلى 10 بارسك Parsec (البارسك يساوي 2.6 سنة ضوئية) وكثافتها حوالي عشر جسيمات لكل سم^3 إلى 10^7 جسيم لكل سم^3 أو يزيد. وهناك السحب الساطعة وتسمي أحيانا السدم الساطعة Bright Nebula. ويعد سديم الجوزاء Gemini Nebula مثالا لهذه السحب.

ومنها من هو متجمع في سحب تكون جد معتمة بحيث تمنع مرور الضوء الآتي من النجوم البعيدة. وتحتوي هذه السحب على نوع الغازات نفسها الموجودة في السحب الساطعة.

ويتم التميز بين سحب ما بين النجوم تبعا لدرجة تأين الهيدروجين إلى منطقتين في الفضاء.إذ يصنع كل نجم حوله منطقة تسمى H_{II} يكون الهيدروجين فيها تام التأين. وينشأ تأين الهيدروجين من امتصاص الضوء فوق البنفسجي U.V القادم من النجوم ذات الحرارة الشديدة. تزيد مناطق H_{II} في الكبر كلما زادت سخونة النجم. وعلى مسافات بعيدة من النجوم يوجد الهيدروجين في حالة متعادلة وتكون درجة التأين صغيرة جدا حيث يقل الضوء فوق البنفسجي القادم من النجوم. وهذه المناطق تسمى منطقة H_I .

وتمثل درجة حرارة غاز ما بين النجوم تعادلا بين الطاقة الداخلة إلي الغاز والخارجة منه . ويأتي أكبر كسب للطاقة من تأين الهيدروجين حيث يقوم الإلكترون المنطلق بتسخين الوسط الذي يتحرك فيه ويأتي هذا التأين بواسطة الأشعة الكونية Cosmic Rays والأشعة الضوئية Photons القادمة من النجوم ، أو من تصادم الغازات بعضها ببعض . مقابل هذا التسخين توجد عمليات تبريد نتيجة إشعاع الطاقة إلي خارج مادة ما بين النجوم.

وفي حالة تعادل التبريد مع التسخين تصل حرارة مناطق H_{II} إلي ما بين 600 إلي 1000 درجة مطلقة .أما في مناطق H_I فلا يوجد تأين وعليه تقل فاعلية أكبر عامل تسخين وتصبح درجة الحرارة أقل بكثير من مناطق H_{II} . وفي بعض الأحيان يحدث تصادم بين السحب بعضها البعض وبالتالي ترتفع درجة حرارة مناطق H_I إلي بضع آلاف من الدرجات لبعض الوقت . نتيجة ما يتبع ذلك من التبريد تفقد السحابة بعض طاقتها لذلك تنخفض درجة حرارة السحابة بعد التصادم تدريجيا إلي ما بين 20 إلي 50 درجة مطلقة .

أما المكون الثاني لمادة ما بين النجوم فهو الغبار الذي ظل يراوغ العلماء بعد اكتشافهم الغاز حتى الثلاثينيات من القرن العشرين ، حين لاحظ بعض العلماء أن بعض النجوم تظهر حمراء Stars Reddening بأكثر مما هي عليه بعد ما علموه من أن لون أي نجم دالة في درجة حرارة سطحه. والغبار هو الجسيمات الصغيرة والصلبة المنتشرة في المادة المبعثرة فيما بين النجوم. والغبار في الغالب مركز في السحب وتبلغ كثافته المتوسطة 10^{-12} جسيم /سم^3 وهذه السحب تسمي السدم العاكسة Reflection Nebula. وحبات الغبار ما هي إلا حبات من الجرافيت أو السيليكون يحاط سطحها بجزيئات الماء والميثان والأمونيا وبعض الأكاسيد وبعض الهيدرات عندما تكون درجة الحرارة منخفضة.

ويستدل مباشرة على التراب الكوني من خلال : أولا السدم السوداء Dark Nebula التي تبدو واضحة في طريق التبانة تمتد عبر عشرات

كما ذكرنا أن مادة ما بين النجوم تتركز في الأذرع اللولبية للمجرة ، وأيضا تقع الشمس في الثلث الأخير من أحد هذه الأذرع. وتتحرك الشمس هي وكواكبها حول مركز المجرة . وخلال هذه الرحلة تمر المجموعة الشمسية خلال مناطق خاوية أو شبه خاوية من سحب مادة ما بين النجوم. وأيضا تمر خلال مناطق عديدة محتشدة بسحب كثيفة. و تلاقي المجموعة الشمسية أحد الأذرع اللولبية مرة كل 60 مليون سنة تقريبا ، و تصبح فرص الاصطدام بين سحب مادة ما بين النجوم الكثيفة و المجموعة الشمسية أعظم في هذه الأوقات. والأن تمر المجموعة الشمسية عند الحرف الداخلي لذراع أوريون Orion بسرعة مقدارها 50 ألف ميل في الساعة خلال سحابة جد رقيقة و لا تؤثر فينا تأثيرا ملحوظ في وقتنا الحاضر. وتبلغ كثافة هذه السحابة ذرة هيدروجين في كل 10 سم^3 . وتتحرك هذه السحابة من ناحية كوكبة قنطورس Centaurus متجهة إلى كوكبة ذات الكرسي Cassiopeia . وعندما تمر المجموعة الشمسية بالسحب الكثيفة فالوضع يتغير ، حيث تعمل هذه السحب علي امتصاص كمية كبيرة من طاقة الشمس وحجبها تلك التي تصل إلى الأرض وبالتالي تقل درجة حرارة سطح الأرض . وقد ربط علماء الفلك في عام 1393 ميلادية بين العصور الكبرى والالتقاء بسحب الغبار في الأذرع اللولبية. وتحدث العصور الثلجية كل 250 مليون سنة تقريبا ، وتظل باقية لملايين معدودة

التفاعلات الكيميائية الأساسية **في مادة ما بين النجوم**
The Basic Chemical Reaction in Interstellar Matter

المخططات الحديثة التي تصف كيمياء مادة ما بين النجوم تحتوى على ما فوق 4000 تفاعل كيميائي بين العناصر والمركبات الكيميائية التي تم رصدها. وهذه التفاعلات صنفت علي حسب المنطقة التي تحدث فيها، ففي المناطق ذات الكثافة المنخفضة فإن العمليات التي تنتج من تصادم أو تفاعل ثلاث أجسام Three body process تكون غير مهمة ويؤخذ في الاعتبار فقط التفاعلات التي تحدث بين جسمين Two body reaction .
ويحسب سرعة التفاعل Rate of Reaction بين المركبين X و Y بالمعادلة التالية

rate = □n(x)n(y)

حيث □ معامل سرعة التفاعل Reaction rate Coefficient بوحدات cm^3s^{-1} و n عدد الجسيمات أو الجزيئات/ cm^{-3} من المركبين X و Y .
وقد صنفت التفاعلات لمادة ما بين النجوم إلي ثلاثة أنواع كما في الجدول (4-2).

<u>عمليات التكوين Formation processes</u>

توجد ثلاث عمليات أساسية بواسطتها تتكون الروابط الجزيئية ، ***العملية الأولى*** تسمى التجمع الإشعاعي Radiative association وفي هذه العملية يصاحب تكون الجزيء الجديد انطلاق فوتون . هذه العملية مهمة حيث إن معدل التفاعل يزيد مع زيادة حجم الأجسام المتصادمة . وعلى الرغم من أن هذا التفاعل مهم في تكوين الجزيئات الكبيرة مثل الميثانول

جدول (4-2) : العمليات الكيميائية في مادة ما بين النجوم

عمليات التكوين Formation process	1-التجمع الإشعاعي Radiative association $X + Y \rightarrow XY + photon$ 2- التفاعلات علي سطح الغبار Grain surface formation $X + Y{:}g \rightarrow XY + g$ 3- الفك الترافقي Associative detachment $X^- + Y \rightarrow XY + e$
عمليات التكسير Destruction process	1- التفكك الضوئي Photodissociation $XY + photon \rightarrow X + Y$ 2- التفكك الاتحادي Dissociative recombination $XY^+ + e \rightarrow X + Y$ 3- التفكك التصادمي Collisional dissociation $XY + M \rightarrow X + Y + M$
عمليات إعادة الترتيب Rearrangement process	1- التفاعل بين الأيونات والجزيئات Ion-molecule exchange $X^+ + YZ \rightarrow XY^+ + Z$ 2- تفاعل انتقال الشحنة Charge transfer $X^+ + YZ \rightarrow YZ^+ + X$ 3- تفاعلات المركبات المتعادلة Neutral-neutral reactions $X + YZ \rightarrow XY + Z$

وتكمن أهمية هذه العملية في أنه بمجرد تكون H_2 في السحب الشفافة (سوف نذكر فيما بعد كيف يتكون H_2) تبدأ كيمياء الكربون تبعا لهذا التفاعل

$$C^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+ + Photon.$$

أما في السحب الكثيفة فإن الميثان Methane (CH_4) يتكون تبعا لهذا التفاعل

$$CH_3^+ + H_2 \rightarrow CH_5^+ + Photon.$$

والعملية الثانية تسمى التكوين على سطح حبيبات الغبار Grain surface formation. وفي هذه العملية يتكون الجزيء الجديد مثل H_2 ، H_2O ، NH_3 ، CH_4 على سطح الغبار في السحب الباردة التي تكون فيها درجة حرارة

$H\ (gas) + H\ (gas) + grain \rightarrow H_2\ (gas) + grain$.

وتتكون الجزيئات على سطح الغبار طبقا لنوع الغبار ، فعندما يكون الغبار سيليكات silicate grains تتكون كمية كبيرة من المركبات العضوية HC_nN على سطح الغبار ، حيث n هو عدد ذرات الكربون ، عند درجة حرارة 500 درجة مطلقة . وفي حالة غبار الجرافيت Graphite grains عندما تكون درجة الحرارة أقل من أو تساوي 20 درجة مطلقة فإن الهيدروجين مع الكربون يكونا الميثان ومركبات أخرى هيدروكربونية التي تكون طبقات متراكبة فوق سطح الغبار . وهذه المركبات تتحول إلى بوليمرات Polymers بتفاعلها مع الموجات فوق البنفسجية القصيرة short UV وكذلك الأشعة الكونية ذات الطاقة المنخفضة. وعند درجات الحرارة أكبر من 77 درجة مطلقة يتكون أول أكسيد الكربون CO، وثاني أكسيد الكربون CO_2 ومواد هيدروكربونية أخرى من تفاعل S,O، N، H على سطح الغبار .

أما النوع الثالث يسمى التفكك الترافقي Associative detachment وهذا النوع ذو دور شبه مهمل في كيمياء مناطق مادة ما بين النجوم ذات الكثافة العالية ولكن هذا النوع كان مهم في كيمياء الكون المبكر Early universe . حيث أنه أحد الطرق التي تكون بها H_2 في بداية الكون

$H + H^- \rightarrow H_2 + e$

<u>عمليات التكسير Destruction processes</u>

في مناطق مادة ما بين النجوم ذات الكثافة المنخفضة أو المتوسطة ، أي السحب الشفافة Diffuse و نصف الكثيفة Translucent ، ينفذ الإشعاع

وقد تم قياس متوسط شدة الإشعاع UV في مادة ما بين النجوم القريبة من المجموعة الشمسية بعدة طرق.واتضح أن الإشعاع الناتج من الجيل المبكر Diluted Early من نجوم التقسيم الطيفي B هو المميز لقيمة الإشعاع في مادة ما بين النجوم ، و تصل أقصى قيمة لشدة الإشعاع ما بين 1200 و 1600 أنجستروم وينتهي عند 912 انجستروم (13.6 إلكترون فولت) التي تمثل حدود ليمان. وخطوط ليمان التي تم اكتشافها عام 1906 ، هي الخطوط الطيفية الممتصة بواسطة مستوى الخمود في ذرات الهيدروجين أو منبعثة منه في حالة الانتقال من هذا المستوي أو إلية على التوالي.

وبواسطة التفكك الضوئي تتكسر الروابط الجزيئية لكل من H_2 ,CO, CN عند أطوال موجيه قصيرة جدا في النطاق ما بين 912 إلى 1110 أنجستروم. أما الجزيئات مثل CH, OH فتتكسر روابطها عند أطوال موجية أكبر من 3000 أنجستروم.

ولا يقتصر دور الـ UV علي تكسير الروابط بل تعمل علي تأين الذرات وبذلك تزداد وفرة الإلكترونات في السحب ذات الكثافة المنخفضة ، أما في السحب ذات الكثافة العالية فإن تأثير هذه الأشعة يكون في المناطق الخارجية و ينعدم تأثيرها تقريبا في اتجاه مركز السحابة ، حيث يقوم الغبار الكوني بامتصاصها وتشتيتها . وتوجد كمية قليلة من UV داخل السحب المظلمة ، نتيجة لإثارة H_2 بواسطة الأشعة الكونية :

Cosmic Ray + $H_2 \rightarrow H_2^* +$ photon.

وهذه العملية تسمى Cosmic ray induced photon .

عندما تنخفض درجات الحرارة إلي ما بين 10 إلى 30 درجة مطلقة الجزيئات المتأينة تتكسر بواسطة التفكك الاتحادي Dissoiative recombination. ولقد وجد أن أيون ثلاثي الهيدروجين Triatomic hydrogen ion (H_3^+) يتكسر طبقا للمعادلة التالية

$$H_3^+ + e \rightarrow H_2 + H$$

بمعامل سرعة تفاعل مقداره 10^{-7} سم^3 / ث تقريبا. أما باقي الجزيئات ذات الوفرة في السحب البين نجمية فإنها تتكسر بمعامل سرعة تفاعل يتراوح

$H_3O^+ + e \rightarrow OH + H + H$
$H_3O^+ + e \rightarrow O + H + H_2$.

ولها احتمالية أكثر من رابطة كيميائية فإن قيمة معامل سرعة التفاعل تختلف من ناتج إلي أخر.

في السحب الكثيفة تتكسر الجزيئات المتعادلة Neutral molecules من خلال التفاعلات الكيميائية مع الأيونات. فنجد أن He^+ الذي نتج من تأين الهليوم بواسطة الأشعة الكونية بمعدل سرعة تفاعل مقداره 10^{-18} في الثانية ، يقوم بكسر الرابطة الكيميائية لجزيء النيتروجين N_2 :

$N_2 + He^+ \rightarrow N + He + N^+$.

كما تتكسر الجزيئات بواسطة التصادم في درجات الحرارة العالية التي تزيد عن 3000 درجة مطلقة. وهذه المناطق تكون بجوار النجوم حديثة التكوين ويحدث بها موجات صدمية Shock waves أو تتعرض لإشعاع شديد قادم من النجوم.

عمليات إعادة الترتيب Rearrangement processes.

ما إن تتكون الروابط الجزيئية ،حتى تبدأ التفاعلات الكيميائية تأخذ طريقها في إعادة ترتيب تلك الروابط لتكون جزيئات أكثر تعقيدا . وهذه الجزيئات تتكون بعدة طرق : ***أولها*** تفاعل الأيونات مع الجزيئات Ion-molecule reaction التي بدأ استخدامها و دراستها في مادة ما بين النجوم منذ الثمانينيات من القرن العشرين لأنه يعتقد أنها تحدث بسهولة عند درجات الحرارة المنخفضة حوالي 10 درجة مطلقة .

وفي السحب البين نجمية ذات درجات الحرارة المنخفضة التي تتراوح من عشر درجات إلي مائة درجة مطلقة ، وكثافة تتراوح من 10^2 إلى 10^7 سم$^{-3}$ ، فإن تفاعلات الطور الغازي Gas-phase تكون عبارة عن تصادم بين جسيمين فقط ، أما التصادم بين ثلاث أجسام فيكون عند كثافة تزيد عن 10^{11} سم$^{-3}$.

في حالة التفاعلات الطاردة للحرارة ، طبقا لنظرية لانجفن Langevin فإن معامل سرعة التفاعل Rate coefficient لا يعتمد على درجة

$C^+ + O_2 \rightarrow O^+ + CO$
$N^+ + H_2 \rightarrow NH^+ + H$

وفي حالة تفاعل أيون مع جزيء قطبي مثل C^+ مع H_2O

$C^+ + H_2O \rightarrow HCO^+ + H$
$C^+ + H_2O \rightarrow H^+ + HCO$

فإن معدل سرعة التفاعل يقل بزيادة درجة الحرارة .

أما ثاني طريقة فهي تفاعل الجسيمات المتعادلة مع بعضها البعض Neutral-Neutral reaction . وبهذه الطريقة تتكون الجزيئات التي لا تتكون بالطريقة الأولى مثل CN, O_2, N_2, CO. عادة هذا النوع من التفاعلات يتم ببطء شديد عند درجات الحرارة المنخفضة مقارنة بتفاعلات الأيونات مع الجزيئات لوجود ما يسمى بحاجز التنشيط Activation barrier. ومع ذلك ثبت معمليا أن معدل سرعة التفاعلات :

$CN + O_2 \rightarrow O + OCN$
$CN + C_2H_2 \rightarrow HC_3N + H$

تقل بمقدار خمسة عن قيمة تفاعلات الأيونات مع الجزيئات التي ذكرناها سابقا. و الجزيئات التي لها عزم زاوي Non-zero angular momentum تتفاعل بسرعة في درجات الحرارة المنخفضة

$O\ (^3p_2) + OH \rightarrow H + O_2$

وآخر عملية كيميائية في إعادة ترتيب الروابط الكيميائية هي تفاعلات انتقال الشحنة Charge transfer reaction وتكتب علي الصورة

$A^+ + B \rightarrow A + B^+$

وتعتبر هذه العملية من أهم العمليات في مادة ما بين النجوم ذات درجات الحرارة المنخفضة (مناطق H_I) بحيث يكون A و B جسيمين مختلفين، لأنها أساس بداية كيمياء الأكسجين في مادة ما بين النجوم طبقا للتفاعل الآتي :

$H^+ + O \rightarrow O^+ + H.$

أما في المناطق ذات درجات الحرارة المرتفعة (مناطق H_{II}) فتتم هذه العملية علي الصورة التالية :

$A^{2+} + B \rightarrow A^{+} + B^{+}$

وفي مناطق درجات الحرارة المرتفعة القريبة من النجوم أو التي تحدث بها موجات صدميه فإن التفاعلات الماصة والطاردة للحرارة تحدث بسهولة .

شبكات (مخططات) التركيب الكيميائي
Chemistry networks

العمليات الكيميائية التي تحدثنا عنها سابقا تتجمع مع بعضها في نماذج لوصف الحالة الكيميائية للسحب الشفافة و الكثيفة في مادة ما بين النجوم ولتحديد أهمية التفاعلات التي تكون مركب كيميائي معين لابد أن نأخذ في الاعتبار عدة حقائق : **أولها** نسبة شيوع العناصر الأساسية H, H_2 ., C, O, N, S, Si, Mg, Na, Fe. ونسبة شيوع هذه العناصر في الشمس Solar abundance بالنسبة إلى الهيدروجين موضحة في الجدول (4-3) . مع ملاحظة

جدول (4-3) :قيمة وفرة العناصر في الشمس بالنسبة إلي الهيدروجين

H	1	**C**	4.0(-4)	**He**	0.10	**N**	9.3(-5)
O	7.4(-4)	**Na**	2.1(-6)	**Mg**	3.8(-5)	**Si**	3.5(-5)
S	1.6(-5)	**P**	2.8(-7)	**Cl**	1.1(-7)	**K**	1.3(-7)
Ca	2.3(6)	**Fe**	3.2(-5)				

إن هذه النسبة لا تمثل القيمة الفعلية في مادة ما بين النجوم ولكنه وجد أن كل من C, O يقل بمقدار 30 % ومعظم العناصر الثقيلة Fe, Mg, Si تتجمع على شكل بلورات في السحب الكثيفة ذات درجات الحرارة العالية

ثانيا : العناصر التي لها طاقة تأين أكبر من 13.6 إلكترون فولت مثل N , O أي أكبر من طاقة تأين الهيدروجين H ، يكون معظمها ذرات متعادلة في سحب مادة ما بين النجوم الشفافة وعند حواف السحب الكثيفة ، أما العناصر التي طاقة تأينها أقل من 13.6 إلكترون فولت مثل Cl, Mg, Na, S, C تكون متأينة في السحب الشفافة ذات درجات حرارة أكبر من 13.6 إلكترون فولت .والجدول (4-4) يوضح قيمة طاقة التأين للعناصر الأساسية في الكون مقاسه بالإلكترون فولت عند المستوى الذري الأول.

جدول (4-4) :طاقة تأين العناصر

H	13.6	**C**	11.26	**He**	24.58	**N**	14.54
O	16.1	**Na**	5.14	**Mg**	7.64	**Si**	8.15
S	10.36	**P**	10.55	**Cl**	13.1	**K**	4.34
Ca	6.11	**Fe**	7.9				

ويعتبر C^+ من أهم الأيونات في المخطط الكيميائي الأيون جزيئي Ion-molecule chemistry لأنه يؤدي إلى تكون جزيئات معقدة من الهيدروكربونات .

و فيما يلي سوف نتحدث عن مخططات التركيب الكيميائي المشتملة على Cl, S, N, O, C, H كل على حدة بالتفصيل :

أولا: كيمياء الهيدروجين ***Hydrogen Chemistry***

يعتبر الهيدروجين ، الذي اكتشفه هنري كافنديش (1731-1810) أكثر العناصر وفرة في الكون ، وهو الوقود النووي الذي تستهلكه النجوم عند إنتاجها للطاقة _ كما أسلفنا سابقا. أما على سطح الأرض فإن توافر

عندما ندرك أن لكل عنصر شحنة نووية مختلفة ، وترتيب إلكتروني مختلف، نجد أن من المعقول أن نتوقع أن لذرات العناصر المختلفة قابليات مختلفة لجذب الإلكترون في الرابطة. لذلك عندما تتحد ذرتان متماثلتان مثل H_2 ، ولكل منهما نفس السالبيه الكهربائية ، ولما كان لكل ذرة نفس القدره علي جذب زوج الإلكترونات في الرابطة ، فإن هذا الزوج سينقسم بالتساوي وسيقضي ، في المتوسط ، 50 % من وقته بجوار كل نواة. لذلك تكون كل ذرة محاطة بالإلكترونين حولها 50 % من الوقت. وفي المتوسط يتساوى هذا مع كون كل ذرة محاطة بإلكترون واحد كل الوقت. وشحنة الإلكترون المتوسط يعادل تماما الشحنة الموجبة علي كل نواة ، وبذلك يكون صافي الشحنة التي تحملها كل ذرة في H_2 مساوية صفرا. ولهذا يكون H_2 غير ثنائي القطبية Dipole وليس له عزم قطبي Dipole moment.

ومن خاصية عدم قطبية H_2 نجد أن تفاعل الاتحاد المشع للطاقة

$H (1S) + H (1S) \rightarrow H_2 + photon$

بطيء جدا ولقلة تركيز كل من H^+, H^- في مادة ما بين النجوم الشفافة فإن

$H^+ + H \rightarrow H_2^+$

$H^- + H \rightarrow H_2 + e$

قيمة H_2 الناتجة من هذه التفاعلات أقل بكثير من القيمة المرصودة .ولهذا فشل نظام التفاعلات الغازية Gas-phase reaction في شرح القيمة المرصودة لجزئ الهيدروجين في مادة ما بين النجوم .

ولقد وجد أن الطريق الوحيد لتحقيق قيمة H_2 هو تكونه على سطح حبات الغبار Recombination of H on grains surface كما يلي

$H (gas) + H (gas) + grain \rightarrow H_2 (gas) + grain$

يتكسر destroyed جزيء الهيدروجين H_2 غالبا بواسطة الفوتونات في السحب الشفافة ونصف الكثيفة من خلال عمليتين للتفكك الاشعاعي

$H_2 + photon \rightarrow H + H$

$H_2 + photon \rightarrow H_2^+ + e$

أما في داخل السحب الكثيفة فإن قيمة الفوتونات تكون قليلة أو شبه معدمة وهذا يؤدي إلى أن التفاعلات الكيميائية من نوع الغاز - جزيء Ion-molecule reaction تصبح هي الفعالة في تكسير H_2 ، وقيمة تكسير هذه التفاعلات قليلة بالنسبة للتكسير بواسطة الفوتونات لذلك يوجد معظم الهيدروجين في صورة H_2. أما في مناطق الموجات الصدمية shocked regions أو مناطق التعرض الشديد للاشعاع النجمي فإن تفاعلات المركبات المتعادلة مع H_2 تتم بسهولة وهذا لكسر حاجز التنشيط activation barriers .

ويتأين H_2 بواسطة الأشعة الكونية cosmic rays بمعدل من 10^{-17} إلى 10^{-16} في الثانية ليزيد 97% من قيمة H_2^+ الموجودة في سحب مادة ما بين النجوم بالتفاعل

H_2 + cosmic ray → $H_2^+ + e$

و يتفاعل H_2^+ مع H_2 بسرعة لينتج H_3^+ ، الذي له الدور المحوري في نظام

$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$

تفاعلات أيون جزيء ion-molecule chemistry من خلال عملية انتقال البروتونات proton-transfers مع أي الأنواع المتعادلة فيما عدا H_2، طبقا للمعادلة الآتية :

$H_3^+ + X \rightarrow H_2 + XH^+$ (1-1)

وحيث X تمثل أيّاً من المركبات الآتية : O, C, CO, S, Si, N_2, SiO ولا يمثل N, O_2 لأن تفاعل H_3^+ معهما يكون ماصا للحرارة Endothermic ، بينما تفاعله مع العناصر الأخرى يكون سريعاً عند درجات الحرارة المنخفضة (من 10 إلى 50 درجة مطلقة) التي تمثل درجة حرارة السحب الكثيفة .

يتبع تفاعل انتقال البروتونات ، تكون أيونات لمركبات كيميائية كبيرة

بواسطة عملية انتزاع الهيدروجين المتتابع hydrogen abstraction reaction sequence

$XH_{n-1}^+ + H_2 \rightarrow XH_n^+ + H$ (1-2)

وهذا التتابع يتوقف عندما يكون الأيون لا يتفاعل مع H_2.

والأيون الناتج من هذا التتابع يحدث له عملية تعادل بواسطة التفكك الاتحادي طبقا للمعادلة الآتية :

$$XH_n^+ + e \rightarrow XH_{n-1} + H$$
$$XH_n^+ + e \rightarrow XH_{n-2} + H_2 \qquad (1\text{-}3)$$

وهذا التفاعل سريع ، فيما عدا حالة H_3^+ .

وفي مناطق الموجات الصدميه فإن درجة الحرارة تعتمد علي سرعة الموجة، حيث تتحول الطاقة الحركية للموجة إلي طاقة حرارية للغازات. في حالة الموجات ذات السرعة المنخفضة التي تتراوح من 15 إلي 50 كم في الثانية ووجود مجال مغناطيسي فإن درجة الحرارة لا ترتفع بشدة عنها في حالة عدم وجود المجال المغناطيسي ، وبالتالي لا تتكسر الجزيئات بواسطة التصادم والتفاعلات الماصة للحرارة مع H, H_2 تتم جنبا إلي جنب مع التفاعلات الطاردة للحرارة طبقا للمعادلة الآتية :

$$XH_{n-1} + H_2 \leftrightarrow XH_n + H \qquad (1\text{-}4)$$

وعندما تكون السرعة أكبر من 50 كم في الثانية فان الجزيئات تتفكك والعناصر تتأين. وعندما ينتهي تأثير الصدمة تبرد الغازات المتأينه وتبدأ في تكوين روابط جزيئية. وفي هذه الحالة يتكون H_2 بواسطة

$$H + e \rightarrow H^- + photon$$
$$H + H^- \rightarrow H_2 + e$$

ثم يبدأ H_2 بالتفاعل مع O ليكون الهيدروكسيل OH

$$O + H_2 \rightarrow OH + H$$

ثم يتفاعل OH مع الوسط لينتج جزيئات مثل CO, SiO, SO,NO . ولقد تم رصد خطوط طيف للأيونات التالية $SO^+, OH^+, H_3^+, CH^+, H_2^+$ في مناطق تبلغ درجة حرارتها عدة آلاف.

2: كيمياء الديوتريوم ***Deutrum chemistry***

توجد العناصر عادة في الطبيعة كخليط من عدة نظائر ، و لكن الهيدروجين هو العنصر الوحيد الذي يمتلك كل من نظائره اسما خاصا به. فنواة الهيدروجين العادي $^1H_1$ تتكون من بروتون واحد. وهو أكثر نظائر الهيدروجين الثلاث توافرا ، ويطلق عليه في بعض الأحيان اسم البروتيوم Protium . وهو الذي تكلمنا عن كيميائه سابقا. أما النظير الثاني فهو الديوتيريوم D . والنظير الثالث هو التريتيوم Tritium ، يبلغ عمره النصفي

يعتبر الديوتريوم أبسط النظائر في الكون لأنه نظير الهيدروجين . ولقد تم رصد الديوتريوم و هيدرايد الديوتريوم $HD,\ H_2D$ في السحب الشفافة القريبة من النجوم اللامعة بواسطة الأشعة الفوق بنفسجية . وكيمياء HD في هذه السحب تشبه كيمياء H_2.

وبوجود جزيء الهيدروجين في السحب الشفافة أو الكثيفة يمكن لـ HD أن يتكون بسرعة بواسطة تفاعل الغازات بالطريقة الآتية

$H^+ + D \leftrightarrow H + D^+$
$D^+ + H_2 \leftrightarrow H^+ + HD$

ويتكسر أيضا HD في السحب الشفافة بسرعة بواسطة الفوتون photo dissociation مقارنة بـ H_2. وفي السحب الكثيفة يتكسر بتفاعله مع المركبات الكيميائية طبقا للمعادلة الآتية :

$XH^+ + HD \leftrightarrow XD^+ + H_2 + \Delta E$ (2-1)

حيث ΔE كمية الطاقة المنطلقة. و X يمثل الجسيم الكيميائي المناسب للتفاعل.

وتتكون الروابط الكيميائية بين الديوتريوم والعناصر الأخرى طبقا للمعادلة (2-1) فيرتبط الديوتريوم مع الهيدروجين لتكون مركبات كبيرة تبدأ بتفاعل H_3^+ مع HD لتكوين H_2D^+

$H_3^+ + HD \leftrightarrow H_2D^+ + H_2 + \Delta E$

ولقد درس هذا التفاعل في المعمل ووجد أن معامل سرعة التفاعل يساوي $1.3X10^{-9}\ cm^3\ s^{-1}$ عند درجة حرارة 80 درجة مطلقة.

وبوجود H_2D^+ في السحب الكثيفة يتفاعل مع أول أكسيد الكربون وجزيء النيتروجين ليعطي الرابطة بين الديوتريوم وكل من الكربون والأكسجين والنيتروجين على النحو التالي :

$H_2D^+ + CO \rightarrow DCO^+ + H_2$
$H_2D^+ + CO \rightarrow HCO^+ + HD$
$H_2D^+ + N_2 \rightarrow N_2D^+ + H_2$
$H_2D^+ + N_2 \rightarrow N_2H^+ + HD$

ويمكن أن تحدث الرابطة بين الديوتريوم والكربون مباشرة بتفاعل سريع يتم بين HD و CH_3^+

$CH_3^+ + HD \rightarrow CH_2D^+ + H_2$

ولقد وجد معمليا أن سرعة هذا التفاعل تساوي $5X10^{-10}\ cm^3\ s^{-1}$ عند درجة حرارة 300 درجة مطلقة مع انطلاق كمية من الطاقة قدرها 0.0258 إلكترون فولت. و بتفاعل

$CH_5^+ + HD \leftrightarrow CH_4D^+ + H_2 + \Delta E$ (طاقة)

وبوجود CH_4D^+ تتكون الرابطة بين الديوتريم والنيتروجين طبقا للتفاعل الآتي :

$CH_4D^+ + N \leftrightarrow HDCN^+ + H_2 + H.$

3- كيمياء الكربون Carbon chemistry

في السحب بين نجمية الشفافة توجد معظم ذرات الكربون على صورة C^+ ، لأن طاقة تأين ionization potenial الكربون أقل من 13.6 إلكترون فولت. في هذا الوسط ذي الحرارة المنخفضة لا يتكون أيون الميثيالدين (CH^+) من خلال التفاعل

$C^+ + H_2 \rightarrow CH^+ + H - 4640\ k$

الماص للحرارة بمقدار 0.4إلكترون فولت . ولكن كيمياء الكربون تبدأ في هذا الوسط بالاتحاد المشع البطيء لأيون الكربون مع H_2 بهذا التفاعل ، بمعدل سرعة rate coefficient يساوي $1x10^{-15}$ سم^3/ ث ، لينتج أيون الميثيلين methylene ion (CH_2^+)

$C^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+ + photon$

و CH_2^+ الناتج يتفاعل بسرعة مع H_2 ليكون CH_3^+

$CH_2^+ + H_2 \rightarrow CH_3^+ + H$

وتتفاعل الالكترونات مع CH_3^+ الناتج بواسطة التفكك الاتحادي dissociative recombination

$CH_3^+ + e \rightarrow CH + H_2$

$CH_3^+ + e \rightarrow CH_2 + H$

لينتج هيدرات متعادلة مثل الميثالدين CH والميثيلين المتعادلين CH_2.

ووجود وفرة من C^+ في السحب الشفافة ونصف الكثيفة ، يؤدي إلى سرعة تكون هيدروكربونات hydrocarbons من خلال تفاعل C^+ مع CH_2, CH بواسطة تفاعل الأيون - جزيء

$C^+ + CH \rightarrow CH^+ + C \quad or \quad C_2^+ + H$

$C^+ + CH_2 \rightarrow CH_2^+ + C \quad or \quad C_2H^+ + H$

نتيجة للتفكك الضوئي السريع rapid photo dissociation لهذه المركبات تتم عملية إنشاء مركبات كربونية متعددة الذرات polyatomic hydrocarbons

أما في السحب الكثيفة فيتفاعل $CH, CH_2, CH_3,$ مع O

$O + CH \rightarrow CO + H$
$O + CH_2 \rightarrow CH + OH$
$O + CH_3 \rightarrow H_2CO + H$

يؤدي ذلك إلى تكون الفورمالدهيد H_2CO وأول أكسيد الكربون CO وبهذا يتحول معظم الكربون إلى CO وفي هذه الحالة يتوقف ceasesتكوين مركبات هيدروكربونية معقده داخل السحابة. ويكون التفاعل المؤثر في تكسير CO هو

$He^+ + CO \rightarrow C^+ + He + O$

حيث ينتج He^+ من تأين الأشعة الكونية للهليوم. ويعتبر هذا التفاعل من العوامل الرئيسية لوجود C^+ في السحب الكثيفة.

ولقلة نسبة وجود C^+ عدم تأثير الفوتونات الضوئية داخل السحب الكثيفة وتحول معظم الكربون إلي أول أكسيد الكربون ، فان كيمياء الكربون في هذه السحب تختلف في بدايتها عن السحب الشفافة ونصف الكثيفة. ويعتبر تفاعل C مع H_3^+ هو مبدأ كيمياء الكربون:

$C + H_3^+ \rightarrow CH^+ + H_2$
$C + H_3^+ \rightarrow CH_2^+ + H$
$C + H_3^+ \rightarrow CH_3^+ + photon$

ولان تفاعل CH_3^+ مع H_2 لتكوين الميثان CH_4 ماص للحرارة ، فإن CH_5^+ يتكون بواسطة تفاعل الاتحاد المشع للطاقة

$H_2 + CH_3^+ \rightarrow CH_5^+ + photon$

ثم يتفاعل CH_5^+ مع COلينتج CH_4

$CO + CH_5^+ \rightarrow CH_4 + HCO^{+.}$

وبوجود كل من CH_3^+ ,CH_4, C^+ تتكون الهيدروكربونات المعقدة داخل السحب الكثيفة علي النحو التالي : أولا بتفاعلات الإدراج insertion reactions بين C^+ و CH_4

$C^+ + CH_4 \rightarrow C_2H_3^+ + H.$

لينتج أستيلين acetylene (C_2H_2)من خلال

$e + C_2H_3^+ \rightarrow C_2H_2 + H.$

ويتفاعل C_2H_2 الناتج مع الكربون و أيونه ليكون C_3H^+ و C_3H من خلال

$C^+ + C_2H_2 \rightarrow C_3H^+ + H.$

$C + C_2H_2 \rightarrow C_3H + H.$

ثانيا من خلال تفاعلات التكثف condensation reaction لذرات الكربون بين CH_4 و CH_3^+

$CH_3^+ + CH_4 \rightarrow C_2H_5^+ + H_2.$

وأيضا بين C_2H_2 و C_2H

$C_2H + C_2H_2 \rightarrow C_4H_2 + H.$

ثالثا عن طريق الاتحاد المشع للطاقة بين C^+, C_n ، حيث n عدد ذرات الكربون ، تبعا للمعادلة الآتية :

$X^+ + Y \rightarrow XY^+ + \text{photon}$ (3-1)

وبهذه الطريقة تتكون المركبات المعقدة علي النحو التالي

$CH_3^+ + H_2O \rightarrow CH_3^+ .H_2O + \text{photon}$

وناتج هذا التفاعل يتحد مع الإليكترون لينتج ميثانول methanol (CH_3OH)

$CH_3^+ . H_2O + e \rightarrow CH_3 OH + H.$

ويتفاعل أيون الهيدرونيوم hydronium (H_3O^+) مع الاثيلين ethylene لينتج الكحول الميثيلي methyle alcohol

$H_3O^+ + C_2H_2 \rightarrow CH_3CH_2OH_2^+$

ليتفاعل مع الإلكترونات ليكون الكحول الايثلي ethyl alcohol

$CH_3CH_2OH_2^+ + e \rightarrow CH_3CH_2OH + H.$

ولقد أثبتت الدراسات أن الطريقة الأولي تعتبر الطريقة الأساسية لتكوين الهيدروكربونات ،حيث أنها تؤدي إلى فقدان ذرة واحدة من الهيدروجين والمركب الناتج علي صورة $C_nH_m^+$ لا يتفاعل سريعا مع جزيء الهيدروجين. وهذا يؤدي بنا إلي أن تفاعلات الطور الغازي ينتج مواد هيدروكربونية غير مشبعة unsaturated hydrocarbon تتوافق مع الأرصاد لسحب ما بين النجوم.

وعن طريق تفاعل تبادل الشحنات exchange reaction يتم تفاعل الهيدروكربونات مع العناصر الثقيلة عن طريق المعادلة الآتية

$C_nH_n^+ + X \rightarrow C_nH_{n-1}X^+ + H$ (3-2)

ثم يتبع هذا التفاعل تفاعل آخر مع الإلكترونات بالمعادلة الآتية

$C_nH_{n-1}X^+ + e \rightarrow C_nH_{n-2}X + H$ (3-3)

ومثال ذلك إنتاج الثيانوميثيل cyanomethyle (CH_2CN) 0

$C_2H_4^+ + N \rightarrow C_2H_3N^+ + H$

$C_2H_3N^+ + e \rightarrow CH_2CN + H$

ومن السحب الباردة يعتبر أيون الفورميل (حامض النمليك) formyl ion (HCO^+) من أهم الأيونات المرصودة بوفرة كبيرة وهو يتكون عن طريق

$H_3 + CO \rightarrow HCO^+ + H_2$

4- كيمياء الأكسجين oxygen chemistry

الأكسجين يوجد في السحب الشفافة متعادلا neutral وذلك لأن طاقة التأين له أكبر من 13.6إلكترون فولت . وكيمياء الطور الغازي للأكسجين تأتي نتيجة لتأين H_2, H بواسطة الأشعة الكونية ، وكذلك تكون H_3^+ . وتبدأ تفاعلات الأكسجين بتفاعل O مع H_3^+ ، H^+ :

$O + H^+ \leftrightarrow O^+ + H - 227\ k$ (4-1)

$O + H_2^+ \rightarrow OH^+ + H$ (4-2)

$O + H_3^+ \rightarrow OH^+ + H_2$

التفاعل الأول تفاعل عكسي ماص للحرارة وهو قريب من تفاعل انتقال الشحنة

near resonant charge transfer ولكي يحدث هذا التفاعل يتطلب درجة حرارة أكبر من 100 درجة مطلقة

ونتيجة للتفاعل الأول والشق الثاني من التفاعل الثاني يتكون أيون الهيدروكسيل OH^+ عن طريق اتحاد O^+ مع H_2

$O^+ + H_2 \rightarrow OH^+ + H$

حالما وجد OH^+ يتكون الهيدروكسيل OH والماء H_2O بسرعة عن طريق انتزاع الهيدروجين hydrogen abstraction والتفكك الاتحادي على النحو التالي :

$OH^+ + H_2 \rightarrow H_2O^+ + H$

$H_2O^+ + H_2 \rightarrow H_3O^+ + H$ (4-3)

$H_3O^+ + e \rightarrow H_2O + H$

$H_3O^+ + e \rightarrow OH + H_2$

وخلال هذه العملية يتكون أيون الهيدرونيوم ، وتتبع هذه العملية أيضا المعادلة (3-1).

ومن خلال التفاعل (4-1) ، (4-2) نجد أن قيمة OH^+ في السحب الشفافة تعتمد على درجة الحرارة وكذلك نسبة تركيز H^+/H_3^+ ومعدل تأين الأشعة الكونية cosmic ray ionization rate

ومن الخواص الفيزيائية للسحب الشفافة فإن معظم جزيئات الأكسجين المتعادلة مثل OH, H_2O تتفكك روابطها الكيميائية بتفاعلها مع C^+ والفوتونات الضوئية . فحاصل تفاعل OHمع C^+ ينتج أول أكسيد الكربون وأيون الهيدروجين

$OH + C^+ \rightarrow CO + H^+$
$OH + C^+ \rightarrow CO^+ + H$

وبمجرد تكون أيون أول أكسيد الكربون يتفاعل مع جزيء الهيدروجين ليكون أيون الفورميل الذي يتفكك بواسطة الإلكترونات ليكون مرة أخرى أول أكسيد الكربون

$HCO^+ + e \rightarrow CO + H$

الذي يتكسر بواسطة الفوتونات الضوئية عند الطول الموجي 1118 أنجستروم .

وفي السحب الكثيفة يتفاعل الأكسجين مع الهيدروكسيل محولا معظم

$OH + O \rightarrow O_2 + H$

أكسجين الوسط إلى جزيء الأكسجين . أما جزيء الماء فإنه لا يتكون عن طريق تفاعل جزيء الهيدروجين مع كل من الأكسجين والهيدروكسيل لأن هذه التفاعلات ماصة للحرارة بمقدار 2000 درجة مطلقة . وهذه التفاعلات لا تتم إلا في مناطق الموجات الصدمية والمناطق التي تتعرض للفوتونات الضوئية بشدة warm photon –dominated regions

$OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$
$H_2 + O \rightarrow HO + H$

وبتكون جزيء الماء يتفاعل مع أيون الفورميل مكونا أيون الهيدرونيوم

$HCO^+ + H_2O \rightarrow CO + H_3O^+$.

وفي مناطق الموجات الصدميه التي تزيد سرعة الموجة فيها عن 50 كم في الثانية فإن الهيدروكسيل يتفاعل مع السيليكون مكونا أول أكسيد السيليكون SiOو مع النيتروجين مكونا أول أكسيد النيتروجين ومع الكبريت مكونا أول أكسيد الكبريت.

5- كيمياء النيتروجين Nitrogen chemistry

بالتباين مع كيمياء الكربون و الأكسجين فأن بداية تفاعلات النيتروجين في سحب ما بين النجوم مازالت غير مفهومة. ففي السحب الشفافة يوجد معظم النيتروجين في صورة ذرية متعادلة لبلوغ طاقة تأينه 14.5إلكترون فولت. وأيون النيتروجين يوجد في تلك السحب نتيجة لتصادم النيتروجين وجزيء النيتروجين مع الأشعة الكونية. و عند درجة حرارة 100 درجة مطلقة يتفاعل أيون النيتروجين مع جزيء الهيدروجين مكونا NH^+

$$N^+ + H_2 \rightarrow NH^+ + H$$

وبدراسة تفاعل النيتروجين مع H_3^+ وجد أن

$$N + H_3^+ \rightarrow NH^+ + H_2$$

تفاعل ماص للحرارة ، بينما

$$N + H_3^+ \rightarrow NH_2^+ + H$$

طارد للحرارة Ethothermic ولكنه غير مقنع لانتقال بروتونين مرة واحدة إلي النيتروجين.

وبمجرد تكون NH^+ يتكون هيدريدات النيتروجين المتعادلة NH, NH_2, NH_3 ، التي يعتبر الأمونيا من أهم مكوناتها ، عن طريق التتابع الآتي :

$$NH^+ + H_2 \rightarrow NH_2^+ + H$$
$$NH_2^+ + H_2 \rightarrow NH_3^+ + H$$
$$NH_3^+ + H_2 \rightarrow NH_4^+ + H$$
$$NH_4^+ + e \rightarrow NH_3 + H$$
$$NH_3^+ + e \rightarrow NH + H_2 \quad \text{or} \quad NH + H + H \quad \text{or} \quad NH_2 + H$$

كما يتفاعل NH_3^+مع جزيء الماء ليكون NH_4^+ الذي يتحول إلي الأمونيا بعد ذلك.

أما في السحب الكثيفة فإن النيتروجين يتأين عن طريق تفاعل جزيء النيتروجين مع أيون الهليوم عن طريق كسر الرابطة الثلاثية القوية بين ذرات النيتروجين strong triple N-N bond.

$$He^+ + N_2 \rightarrow N^+ + N + He$$

أو عن طريق التأين التكسري dissociative ionization لجزيء النيتروجين مع أيون الهليوم

$$He^+ + N_2 \rightarrow N^+ + N + He^+ + e$$

وفي كل من السحب الشفافة والكثيفة فإن تفاعل المركبات المتعادلة تلعب دورا هاما في تكوين مركبات تحتوي علي النيتروجين. فنجد أن

$CH + N \rightarrow CN + H$
$OH + N \rightarrow NO + H$

ويعتبر تفاعل السينوجين CN مع الأسيتيلين C_2H_2 من أهم المصادر لتكوين السينوبولينس cyanopolynes ($C_{2n}CN$) الذي تم رصده في بعض السحب المظلمة.

6- كيمياء الكبريت Sulfur Chemistry

كيمياء الكبريت في السحب الباردة تعتبر لغزا constitutes a puzzle حيث إن معظم مركبات الكبريت تتكون بتفاعلات ماصة للحرارة .

ففي السحب الشفافة يوجد الكبريت في صورة S^+ ، ولكنه لا يتفاعل بسهولة مع H_2

$S^+ + H_2 \rightarrow SH^+ + H$

ليكون SH^+ لكون هذا التفاعل ماصاً للحرارة ، أما في السحب الكثيفة فإن الكبريت يتفاعل مع H_3^+

$S + H_3^+ \rightarrow SH^+ + H_2$

ليكون SH^+ ولكن تفاعله مع H_2 لا يتم لأن هذا التفاعل ماص للحرارة أيضا وهذا يعني أن هيدرايد الكبريت لا يتكون في درجات الحرارة المنخفضة . ولكن الأرصاد دلت على وجود مركبات للكبريت في السحب الباردة ، وهذه المركبات يمكن أن تتكون بطريقتين ، الأولى : بتفاعل S^+ مع CH ليكون أول كبرتيد الكربون carbon monosulphide (CS)

$S^+ + CH \rightarrow CS + H^+$

ويتفاعل S مع C_2, وOH ليكون أول أكسيد الكبريت sulphur monoxide (SO) و أول كبرتيد الكربون carbon monosulphide (CS)

$S + C_2 \rightarrow CS + C$
$S + OH \rightarrow SO + H$

ثم يتفاعل SO مع OH ليكون SO_2 حيث إن هذا التفاعل

$SO + OH \rightarrow SO_2 + H$

لا يعتمد على درجة الحرارة

ولشدة قطبية CS فإنه يتفاعل بسرعة مع H_3^+

$H_3^+ + CS \rightarrow HCS^+ + H_2$

ليكون أيون كبرتيد حامض النمليك thioformyle ion (HCS^+) عند درجات الحرارة العادية لسحب ما بين النجوم . وبوجود S^+ يمكن أن تتكون جزيئات متعددة ذرات الكربون مع الكبريت ، فنجد S^+ يتفاعل مع C_2H_2 ليكون HC_2S^+

$S^+ + C_2H_2 \rightarrow HC_2S^+ + H$

الذي يتفاعل مع الإلكترونات ليكون C_2S

$HC_2S^+ + e \rightarrow C_2S + H$

وبنفس الطريقة

$S^+ + C_3H_2 \rightarrow HC_3S^+ + H$
$HC_3S^+ + e \rightarrow C_3S + H$

نحصل على C_3S

في مناطق الموجات الصدمية ، حيث ترتفع درجة الحرارة ، نجد أن هيدرايد الكبريت يتكون بسهولة وكذلك المركبات الماصة للحرارة

$S + H_2 \rightarrow S + HS$
$SH + H_2 \rightarrow H_2S + H$
$SH + O \rightarrow SO + H$
$S + OH \rightarrow SO + H$
$S + O_2 \rightarrow SO + O$
$SO + O_2 \rightarrow SO_2 + O$

7- كيمياء الكلور Chlorine Chemistry

في السحب الشفافة والكثيفة تكون كيمياء الكلور بسيطة للغاية ، وذلك لأن نسبة وجود fractional abundance الكلور صغيرة جداً. ففي السحب الشفافة يتأين الكلور بواسطة الفوتونات الضوئية أما في السحب الكثيفة يتأين بواسطة الأشعة الكونية. وبوجود أيون الكلور Cl^+ يتفاعل مع جزيء الهيدروجين مكونا أيون كلوريد الهيدروجين Hydrogen chloride ion (HCl^+)

$Cl^+ + H_2 \rightarrow HCl^+ + H + 0.17ev$

وخروج طاقة مقدارها 0.17 ev . وفي حالة عدم توفر Cl^+ بالقدر الكافي فى السحب الكثيفة ، حيث تكون معظم ذرات الكلور في حالة ذرية متعادلة، يتكون HCl^+ عن طريق تفاعل الكلور مع H_3^+. ويتكسر هذا الأيون عن طريق تفاعلة مع جزيء الهيدروجين والإلكترونات لينتج H_2Cl^+

$HCl^+ + H_2 \rightarrow H_2Cl^+ + H$

$HCl^+ + e \rightarrow Cl + H$

والتفاعل الأول أسرع من الثاني لأن معامل سرعة التفاعل الأول أكبر من الثاني الذي يعتمد علي درجة الحرارة.

ويعتبر كلوريد الهيدروجين من الجزيئات المهمة لأنه من أحد العوامل التي تقوم بتبريد مادة ما بين النجوم وهو أكثر جزيئات الكلور وفرة. ويتكون هذا الجزيء بواسطة التفكك الاتحادي و تفاعل أيون جزيء H_2Cl^+ علي النحو التالي:

$H_2Cl^+ + e \rightarrow HCl + H$
$H_2Cl^+ + CO \rightarrow HCl + HCO^+$
$H_2Cl^+ + H_2O \rightarrow HCl + H_3O^+$

والتفاعل الأول من هذه المجموعة غير مؤثر في إنتاج HCl في السحب الباردة لأنه يعتمد علي درجة الحرارة ، بينما التفاعل مع CO يعتبر مهماً لأن القابلية البروتونية لأول أكسيد الكربون proton-affinity علي انتزاع بروتون أكبر من كلوريد الهيدروجين. ولا يتكون كلوريد الهيدروجين مباشرا من تفاعل الكلور مع جزيء الهيدروجين لأن هذا التفاعل ماص للحرارة بمقدار 0.21 إلكترون فولت ، وبالتالي فهو لا يحدث إلا في مناطق الموجات الصدمية.

ولا يتكسر كلوريد الهيدروجين بتفاعله مع H^+ , H_3^+ لأن ناتج التفاعلات يكون HCl^+, H_2Cl^+ الذين بدورهما ينتجان HCl كما سبق. ويتفاعل الكلور أيضا مع CH_3^+ ليكون H_2CCl^+ الذي بدوره يتفاعل مع O, NH_3, C, H_2O لينتج HCl.

أما الرابطة بين الكلور و الأكسجين فهي تتم عن طريق تفاعل HCl مع أيون الكربون لينتج CCl الذي يتفاعل مع O ليكون ClO.

8- كيمياء الفوسفور Phosphorus Chemistry

برغم أن الفوسفور قد تم رصده في الشمس ، إلا أنه لم يرصد كعنصر في مادة ما بين النجوم. ولكنه تم رصده في السحب الشفافة كأيون بينما في السحب الكثيفة كجزيء متحد مع عناصر أخرى. وقد وجد أن قيمة تركيز أيون الفوسفور تقل بمقدار ثلاثة عن قيمته في الشمس.

في السحب الشفافة وجد أن PO^+ هو مفتاح الجسيمات key species التي تحتوي علي الفوسفور. ويتكون PO^+ بخطوتين :

$P + photon \rightarrow P^+ + e$
$P^+ + OH \rightarrow PO^+ + H$

ثم يتكسر فقط بتفاعله مع الإليكترونات والصوديوم Na لأنه لا يتحد unreactive مع معظم الجزيئات

$PO^+ + e \rightarrow P + O$
$PO^+ + Na \rightarrow Na^+ + PO.$

وفي السحب الكثيفة يكون الفوسفور روابط كيميائية مع الهيدروجين والكربون والأكسجين والنيتروجين والكبريت.

وعلي الرغم من وجود وفرة من جزيء الهيدروجين ووجود أيون الفوسفور فإن تفاعلهما الثنائي binary لا يتم لأنه ماص للحرارة بمقدار كبير. وبالتالي فرابطة الفسفور مع الهيدروجين تبدأ بالتفاعل مع H_3^+ , HCO^+

$P + H_3^+ \rightarrow PH^+ + H_2$
$P + HCO^+ \rightarrow PH^+ + CO$

و PH^+ لا يتفاعل ثنائيا مع H_2 بل عن طريق الاتحاد الإشعاعي

$H_2 + PH^+ \rightarrow PH_3^+ + photon$

ويتكسر PH_3^+ بواسطة الإلكترونات ليكون PH, PH_2 اللذان بدورهما يتفاعلان مع الأكسجين ليكونا PO, HPO . وتتكون أيضا رابطة الفوسفور مع الأكسجين من تفاعل

$P + O_2 \rightarrow PO + O.$

وتبدأ رابطة الفسفور مع النيتروجين بالتفاعل السريع لـ PO مع N

$N + PO \rightarrow PN + O.$

وكذلك

$PH + N \rightarrow PN + H$

وتسهم أيضا الأيونات في هذه الرابطة عن طريق تفاعل الأمونيا مع P^+, PH^+ ، وإن كانت هذه الإسهامات أقل أهمية insignificant من التفاعلات السابقة.

وللفسفور تفاعلات مع الكربون ، حيث تبدأ تلك الرابطة بالتفاعلات مع الهيدروكربونات

$P^+ + CH_4 \rightarrow PCH_2^+ + H_2$
$PH^+ + CH_4 \rightarrow PCH_3^+ + H_2$

وتتفاعل كذلك المركبات الكبيرة مع الفوسفور

$P^+ + C_2H_4 \rightarrow PC_2H_2^+ + H_2$
$PH^+ + C_2H_4 \rightarrow PC_2H_3^+ + H_2$
$P + C_nH_2^+ \rightarrow PC_nH^+ + H$

و عند درجة حرارة تتراوح بين 100 إلى 300 درجة مطلقة تبدأ رابطة الفوسفور مع الكبريت بالتفاعل الطارد للحرارة

$P^+ + S \rightarrow S^+ + P \quad + 3$ kcal/mole

وتبدأ تفاعلات الجسيمات المتعادلة مع جزيئات الفوسفور

$H + PH_3 \rightarrow PH_2 + H_2$
$O + PH_2 \rightarrow PH + OH$
$O + PH_2 \rightarrow HPO + H$

9- كيمياء السيليكون Silicon Chemistry

على الرغم من أن SiO أكسيد السيليكون Silicon monoxide قد تم رصده بعد فترة قصيرة من رصد أول أكسيد الكربون CO في مادة ما بين النجوم في عام 1970 ، إلا أنه لم يرصد إلا في المناطق ذات الكثافات الكبيرة ودرجات الحرارة المرتفعة المصاحبة لتكون النجوم الشابة young stellar object. وكيمياء السيليكون مشابهة لكيمياء الكربون.

في السحب الشفافة ومتوسطة الكثافة السيليكون يكون في حالة أيونية حيث تبلغ طاقة تأينة 8.15 ev . والرابطة الجزيئيه بين السيليكون والهيدروجين لتكوين هيدرايد السيليكون Silicon hydrides تبدأ بتفاعل أيون السيليكون Si^+ مع ذرة الهيدروجين عن طريق التجمع الإشعاعي radiative association لتنتج أيون SiH^+ مع خروج طاقة

$Si^+ + H \rightarrow SiH^+ +$photon (طاقة)

وبمجرد تكوين SiH^+ يتكسر بسرعة بواسطة عمليتي التفكك الاتحادي Dissoiative recombination والتفكك الضوئي Photodissociation

$SiH^+ + e \rightarrow Si + H$,
$SiH^+ +$ photon $\rightarrow Si^+ + H$

لينتج ذرتي سيليكون وهيدروجين بجانب أيون السيليكون.

ويتكسر أيضا SiH^+ بتفاعله مع الهيدروجين والأكسجين لينتج Si^+ و الرابطة الجزيئية بين السيليكون والأكسجين ، والتي تتمثل في أيون أكسيد السيليكون SiO^+

$SiH^+ + H \rightarrow Si^+ + H_2$,
$SiH^+ + O \rightarrow SiO^+ + H$.

وعندما تكون درجة حرارة السحابة مرتفعة يتكون أكسيد السيليكون من تفاعل

$Si + OH \rightarrow SiO + H$,

ثم يتكسر بواسطة التفكك الضوئي

أما في السحب الجزيئية وعلى الرغم من أن مكونها الأساسي هو جزئ الهيدروجين ، فأن تفاعل أيون SiH^+ مع H_2 لينتج أيون SiH_2^+ يحتاج لدرجة حرارة مرتفعة

$SiH^+ + H_2 \rightarrow SiH_2^+ + H$

وجزئ كبرتيد السيليكون SiS الذي تم رصده في السحب الشفافة والنصف كثيفة يمثل الرابطة الجزيئية بين السيليكون والكبريت. ويتكون هذا الجزئ وأيونة من التفاعل الآتي

$S^+ + SiH \rightarrow SiS + H^+$
$S^+ + SiH \rightarrow SiS^+ + H$.

ويتفاعل أيون كبرتيد السيليكون مع جزئ الهيدروجين ليتكون $SiSH^+$

$SiS^+ + H_2 \rightarrow SiSH^+ + H$,

الذي يتفكك بواسطة تفاعله مع الإلكترونات ليكون كبرتيد السيليكون مرة أخرى

$SiSH^+ + e \rightarrow SiS + H$.

وفي السحب الكثيفة تبدأ كيمياء السيليكون بتفاعل السيليكون مع أيون ثلاثي الهيدروجين H_3^+ ليتكون SiH^+ و SiH_2^+

$Si + H_3^+ \rightarrow SiH^+ + H_2$,
$Si + H_3^+ \rightarrow SiH_2^+ + H$

حيث أن تفاعل Si و Si^+ مع جزئ الهيدروجين لتكوين SiH و SiH^+ يحتاج إلى درجة حرارة تزيد عن 10^4 درجة مطلقة. وبتفاعل الاتحاد الإشعاعي radiative recombination بين أيون السيليكون وجزيئ الهيدروجين يتكون أيون SiH_2^+

$Si^+ + H_2 \rightarrow SiH_2^+ + \text{photon}$ (طاقة).

وعن طريق التفكك الاتحادي لأيون SiH_2^+ يتكون SiH

$SiH_2^+ + e \rightarrow SiH + H$,

وبتفاعل SiH_2^+ مع H_2 يتكون أيون SiH_3^+

$SiH_2^+ + H_2 \rightarrow SiH_3^+ + H$,

وجزيئ SiH يتكسر بواسطة التفكك الضوئي

$SiH + photon \rightarrow Si + H$,

وبتفاعل SiH مع O و C^+ ليكون الرابطة الجزيئية بين السيليكون والأكسجين والكربون في السحب الكثيفة

$SiH + O \rightarrow SiO + H$,
$SiH + C^+ \rightarrow SiC^+ + H$.

وفي حالة درجات الحرارة المرتفعة يتفاعل السيليكون وأيون السيليكون مع الهيدروكسيل ليكونا أكسيد السيليكون وأيونه

$Si^+ + OH \rightarrow SiO^+ + H$,
$Si + OH \rightarrow SiO + H$,

ويتفاعل أيضا Si^+ مع جزئ الماء الغازي وأكسيد السيليكون مع أيون ثلاثي الهيدروجين ليكونا أيون $HSiO^+$

$Si + H_2O \rightarrow HSiO^+ + H$,
$SiO + H_3^+ \rightarrow HSiO^+ + H_2$.

ويتكسر $HSiO^+$ بواسطة تفاعله مع أول أكسيد الكربون وبعملية التفكك الاتحادي

$HSiO^+ + CO \rightarrow SiO + HCO^+$,
$HSiO^+ + e \rightarrow SiO + H$.

ونلاحظ من التفاعلات السابقة أنها تؤدي في النهاية إلى تكون أكسيد السيليكون الذي يتفاعل مع أيون الكربون ليكون رابطة كيميائية بين السيليكون والكربون ليكون أيون كربيد السيليكون عن طريق هذا التفاعل

$SiO + C^+ \rightarrow SiC^+ + O$.

ويتفاعل ايون كربيد السيليكون SiC^+ الناتج مع H_2 ليكون $CSiH_2^+$ و $CSiH^+$

والرابطة الجزيئية بين السيليكون و النيتروجين في السحب الكثيفة تظهر في جزئ نيتريد السيليكون وبعض المركبات الأخرى ، والتي تأتي نتيجة للتفاعلات الآتية:

$SiH + N \rightarrow SiN + H$
$Si^+ + NH_3 \rightarrow H_2SiN^+ + H$.

وبمجرد تكون H_2SiN^+ يتفاعل مع الإلكترونات ليكون جزئ HSiN

$H_2SiN^+ + e \rightarrow HSiN + H$.

تـطبيقـات Applications

إن دراسة كيمياء العناصر والجزيئات والنظائر التي تم رصدها في الأنواع المختلفة للسحب مادة ما بين النجوم تعتبر من الأهمية في توضيح العديد من الخواص الفيزيائية ، التي تشمل تركيب السحب وحركتها.

والخواص التركيبة والحركية لسحب مادة ما بين النجوم تتلخص في معرفة كل من توزيع درجات الحرارة ومصادرها ، وتوزيع الكتل والحجوم والكثافات. ويمكن حساب عمر السحب. بقياس قيمة تركيز الجسيمات والأيونات والنظائر ومن ثم قياس معدل التأين، وقياس قوة وشكل المجال المغناطيسي وحساب سرعة الانكماش والدوران داخل السحب البين نجمية. وأخيرا حساب الموجات الصدمية التي تنشأ داخل السحب ، أو بين السحب وبعضها البعض نتيجة لتصادمها.

وحيث إن تفاعل أيون - جزيء ion-molecule من أهم التفاعلات التي تتم في مادة ما بين النجوم ، نجد أن بعض الخواص السابقة يمكن حسابها مباشرةً من الدراسة الكيميائية. والبعض الآخر يمكن أن تساعد الكيمياء في معرفته أو دراسته بعد تحليل البيانات الخاصة به ، والمثال على ذلك حساب درجات الحرارة والكثافة وحجم السحابة من رصد طيف أول أكسيد الكربون ونظائره .

ومن الدراسات الفيزيائية لمادة ما بين النجوم اتضح أن كمية التركيز العددية للإلكترونات (أي كمية التركيز العددية للأيونات) تلعب دورا هاما في الخواص التركيبية والحركية. وكمية تركيز الأيونات من العوامل التي يمكن دراستها وحسابها بصورة مباشرةٍ بواسطة الكيمياء. أو عن طريق الأرصاد المباشرة لـ HCO^+ ، ولقد وجد أن قيمة التركيز العددية لـ HCO^+ تقريبا أكبر من أي أيون آخر. وحدود قيمة التركيز العددية للإلكترونات تعطى بالعلاقة الآتية :

$$6x10^{-9}\, n(H_2)/R > n(e) > n(HCO^+)$$

حيث $R=n(DCO^+)/n(HCO^+)$

و بمعرفة كمية التركيز العددية للأيونات يمكن معرفة :

1- تأثير المجال المغناطيسي على النجم الجنيني المتكون من مادة ما بين النجوم ، حيث يزداد هذا التأثير بزيادة كمية تركيز الأيونات لحدوث الاقتران coupling دائما بين المجال المغناطيسي والأيونات. ولقد أوضحت الدراسات التحليلية لعملية ثبات stability مادة ما بين النجوم تجاه عملية الانكماش التجاذبي في حالة وجود المجال المغناطيسي ، أن زمن الانكماش يعتمد على كمية التركيز العددية للأيونات. فمثلا في حالة سحابة تبلغ الكثافة العدديه للغاز بها 10^4 سم$^{-3}$ وتنكمش في وجود مجال مغناطيسي شدته مائة ميكرو جاوس ، يبلغ زمن الانكماش حوالي 200 ألف سنة ، عندما تكون قيمة التركيز العددية للأيونات بالنسبة للتركيز العددي لجزيئ الهيدروجين 10^{-8}. بينما هذا الزمن يزيد بمقدار عشرة إلي مائة مرة عندما تكون النسبة السابقة 10^{-6} .

2- مصدر تأين وتسخين الغازات المكونة لتلك السحب.

فبدراسة العلاقة بين CO و HCO^+ في كيمياء أيون جزئ نستنتج معدل التأين. ففي حالة أن تكون الأشعة الكونية cosmic rays هي مصدر التأين ، وحيث إن الأشعة الكونية تأين جزئ الهيدروجين ليتكون أيون جزئ الهيدروجين الذي يتفاعل مع جزئ الهيدروجين بسرعة بمجرد تكونه ليكون أيون ثلاثي ذرات الهيدروجين H_3^+

$H_2 + CR \rightarrow H_2^+ + e$

$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_2^+ + e.$

وأيون ثلاثي الهيدروجين يتفاعل مع أول أكسيد الكربون CO ليكون HCO^+

$H_3^+ + CO \rightarrow HCO^+ + H_2$

الذي يتكسر بتفاعله مع الإلكترونات والذرات والجزيئات الأخرى

$HCO^+ + e \rightarrow H + CO$

ومن قانون معدل التركيز العددي، الذي ينص على :

التركيز العددي = معدل التكوين ـ معدل التكسير

وفي حالة ثبوت قيمة التركيز العددي مع الزمن steady state نجد أن معدل التكوين يتساوى مع معدل التكسير. وبتطبيق هذا القانون على التفاعلات السابقة نجد أن

$$n(H_3^+) = \{2\zeta_{CR} / n(H_2)\} / \{k_e n(e) + \Sigma\, k_I n(X_I)\} \qquad (1)$$

$$n(HCO^+) = k_{co} n(H_3^+) n(CO) / \{k_e' \, n(e) + \Sigma' \, k_I n(X_I)\} \qquad (2)$$

3- في وسط مادة ما بين النجوم ذات الكثافة المرتفعة هناك علاقة وثيقة بين التركيز العددي للإلكترونات والتركيز العددي لأيونات العناصر الثقيلة. و باستخدام تفاعلات أيون جزئ في كيمياء الكبريت ، وإيجاد النسبة العددية بين قيمة تركيز HCS^+ و CS يمكن حساب قيمة deplated للعناصر الثقيلة مثل الحديد Fe والماغنسيوم Mg من العلاقة التالية :

f(HCS^+)/f(CS) = f(polyatomic ions أيونات متعددة الذرات)/[10^2f(e) + f(O)]

حيث f(X) هي النسبة العددية لتركيز العنصر X بالنسبة إلي تركيز جزئ الهيدروجين.

ففي حالة f(HCS^+)/f(CS) =10^{-2} نجد أن

f(polyatomic ions أيونات متعددة الذرات) = f(e)

وهذا يعني أن نسبة تركيز العناصر الثقيل أقل من نسبة تركيز الأيونات.

4- تعد دراسة كيمياء نظائر الكربون من أحد العوامل المفيدة في معرفة تركيب السحب البين نجمية عند مقارنة النتائج التحليلية مع الأرصاد. فنجد أن نظائر الكربون تستخدم في دراسة عدة مجالات : أولها دراسة التطور النووي nuclear evolution داخل المجرة ، ثانيا توضيح العلاقة بين كثافة جزئ الهيدروجين وكثافة نظير أول أكسيد الكربون ، وثالثا حساب درجات الحرارة عن طريق التغير في نسبة النظائر خلال السحابة ، وآخرها تحديد نقطة أصل الفوتونات المشعة والممتصة في خط الطيف.

5- تتم عملية تبريد cool سحب مادة ما بين النجوم بإشعاع الطاقة وليس بأي طريقة أخرى. وعملية إشعاع الطاقة عادة تبدأ أولا بإثارة excitation الذرات والأيونات والجزيئات ، من مستوى طاقة الخمود إلى مستوى طاقة أعلى ، عن طريق التصادم بجسيم آخر. في هذه العملية الجسيم المثار يكتسب طاقته من طاقة حركة الجسيم المصتدم به

$A + B \rightarrow A + B^*$.

الجسيم المثار بعد فترة زمنية يشع الطاقة التي اكتسبها على هيئة فوتونات إلى الفضاء المحيط بسحب مادة ما بين النجوم

$B^* \rightarrow B$ + photon.

وهذا يعني أن غاز مادة ما بين النجوم فقد طاقة حركته مما يؤدي إلى برودته.

ففي السحب ذات درجات الحرارة التي تزيد أو تساوي مائة درجة مطلقة فإن أيون الكربون وأيون السيليكون والأكسجين وجزئ الهيدروجين من أهم الجزيئات التي تقوم بعملية تبريد سحب مادة ما بين النجوم.

فعند تصادم أيون الكربون وهو في مستوى $C^{+}(\,^{2}P_{1/2}\,)$ مع الهيدروجين وجزئ الهيدروجين والإلكترونات ، فإن أيون الكربون يثار إلى المستوى الأعلى $C^{+}(^{2}P_{3/2})$

$$C^{+}(\,^{2}P_{1/2}\,) + H \rightarrow C^{+}(\,^{2}P_{3/2}\,) + H$$
$$C^{+}(\,^{2}P_{1/2}\,) + H_2 \rightarrow C^{+}(\,^{2}P_{3/2}\,) + H+2$$
$$C^{+}(\,^{2}P_{1/2}\,) + e \rightarrow C^{+}(\,^{2}P_{3/2}\,) + e.$$

والفرق في الطاقة بين المستويين يساوى $1.4X10^{-21}$ جول ، والذي يكافئ 92 درجة مطلقة. وبعد فترة زمنية يعود أيون الكربون إلى وضعة الأصلي ويشع كمية الطاقة التي اكتسبها.

وعندما يتصادم أيون السيليكون $S^{+}(\,^{2}P_{1/2}\,)$ مع الإلكترونات ، فإن أيون السيليكون يثار إلى $S^{+}(^{2}P_{3/2})$

$$Si^{+}(\,^{2}P_{1/2}\,) + e \rightarrow Si^{+}(\,^{2}P_{3/2}\,) + e.$$

والفرق في الطاقة بين المستوى التهيج ومستوى الخمود يشع بعد زمن قصير ، وتبلغ مقدار تلك الطاقة 413 درجة مطلقة.

وأخيرا عندما يتصادم الأكسجين مع الهيدروجين والإلكترونات

$$O^{+}(\,^{3}P_2\,) + e \rightarrow O^{+}(\,^{3}P_2\,) + e$$
$$O^{+}(\,^{3}P_2\,) + H \rightarrow O^{+}(\,^{3}P_2\,) + H.$$

فإن كمية الطاقة التي تمتص ثم تشع بعد ذلك قدرها 326 درجة مطلقة للتصادم مع الإلكترونات ، و 228 درجة مطلقة للتصادم مع الهيدروجين.

وفي السحب الكثيفة التي تبلغ درجة حرارتها عشر درجات مطلقة فإن أول أكسيد الكربون هو العامل الأساسي في عملية التبريد. حيث يبلغ الفرق في الطاقة بين مستوى الدوران (rotational level) J=0 و J=1 مايكافئ 5.5 درجة مطلقة.

6- إن سحب غاز مادة ما بين النجوم بعيدة جدا عن حالة التعادل الحراري وتفقد فيه لذلك درجة الحرارة معناها. إلا أنه يمكن تعريف درجة حرارة حركة يمكن حسابها من السرعة المتوسطة للجسيمات ، وتمثل تعادلا بين الطاقة الداخلة إلى الغاز (أي التسخين) والخارجة منه (أي التبريد).

وعوامل تسخين الغاز كثيرة ، منها تأين الجسيمات بواسطة :

1- الإشعاع النجمي star light:

$A + photon \rightarrow A^{+} + e$

في كل عملية تأين يأخذ الإلكترون المنطلق طاقة حركة تزداد في الكبر كلما إزدادت طاقة الكم الممتصة ، أي زيادة شدة الإشعاع النجمي. والإلكترون المنطلق من هذه العملية يختلط بالغاز ، ويتصادم معه في تصادمات مرنة elastic وغير مرنة inelastic ، وبالتالي يصبح هذا الإلكترون من أحد عناصر تسخين الغاز. ففي مناطق H_{II} تكون طاقة الفوتونات أكبر من 13.6 إلكترون فولت ، وهذا يؤدي إلى تأين الهيدروجين

$H + photon \rightarrow H^{+} + e.$

أما في مناطق H_{I} تكون طاقة الفوتونات أقل من 13.6 إلكترون فولت ، وهذا يؤدي إلى تأين الكربون الذي يمثل العنصر الأساسي في عملية التأين.

$C + photon \rightarrow C^{+} + e.$

والإلكترون الناتج من عملية تأين الكربون تبلغ طاقة حركته 2.3 إلكترون فولت.

2- الأشعة الكونية cosmic ray:

$A + CR \rightarrow A^{+} + e$

عندما تبلغ طاقة الأشعة الكونية مليونان إلكترون فولت (2Mev) ، فإن الإلكترون الناتج من عملية التأين تبلغ طاقته 30 إلكترون فولت. وتبلغ احتمالية تصرف الإلكترونات الناتجة من هذه العملية ثلاثة احتمالات ، أولها أن جزءاً من هذه الإلكترونات يقوم بتسخين الغاز مباشرة عن طريق التصادم المرن. أما ثاني احتمال فإن الإلكترونات تتصادم مع الهيدروجين مما يؤدي إلى تأينه

$H + e \rightarrow H^{+} + e + e.$

وفي هذه الحالة يزيد عدد الإلكترونات في سحب مادة ما بين النجوم ، و تبلغ طاقة الإلكترون الثاني 3.4 إلكترون فولت.
أما ثالث احتمال يحدث عندما تقل طاقة الإلكترونات عن 13.6 إلكترون فولت. في هذه الحالة يثار excite الهيدروجين نتيجة لتصادم الإلكترونات مع الهيدروجين.

$H(1s) + e \rightarrow H(2p) + e \rightarrow e + H(1s) + photon$

ثم بعد ذلك تعود ذرة الهيدروجين إلى حالة الخمود بإشعاع طاقة التهيج excitation على شكل فوتون ، مما يؤدي إلى برودة السحابة. وهذه العملية تتوقف عندما تقل طاقة الإلكترونات عن 10.2 إلكترون فولت.

3- أشعة اكس X-ray

التأين بواسطة أشعة أكس يشابه التأين بواسطة الأشعة الكونية ، فيما عدا أن

$A + X\text{-ray} \rightarrow A^{+} + e.$

فالعنصر المؤثر هنا هو الهليوم (الذي يمثل 10% من عدد ذرات الهيدروجين) بدلا من الهيدروجين ، لأن مساحة مقطع امتصاص cross section for absorption الهليوم لأشعة أكس أكبر من مساحة مقطع امتصاص الهيدروجين لأشعة أكس. ولقد وجدا أن أشعة أكس ذات طاقة قدرها 50 إلكترون فولت عندما تصطدم مع الهليوم تنتج إلكترون ذو طاقة هدرها 25 إلكترون فولت.

ويتبع تأين جزئ الهيدروجين (طاقة تأين جزئ الهيدروجين تساوي 15.4 إلكترون فولت) بواسطة الأشعة الكونية أو أشعة أكس تفاعلات كيميائية طاردة للحرارة ، مثل

$H_2^{+} + H_2 \rightarrow H_3^{+} + H$

$H_3^{+} + e \rightarrow 3H$ أو $H_2 + H.$

فكمية الطاقة الناتجة من التفاعلات السابقة التي تضاف إلى سحب مادة ما بين النجوم تقدر بحوالي 11 إلكترون فولت. وجزء من هذه الطاقة يكتسبه الجزيء نفسه والجزء الآخر يدخل في عملية التسخين.

وبالمثل باقي المركبات الكيميائية ذات التفاعلات الطاردة للحرارة تساعد في تسخين سحب مادة ما بين النجوم . والعكس صحيح فالتفاعلات الماصة للحرارة وعملية الإثارة تساعد في عملية تبريد سحب مادة ما بين النجوم.

7- تحسب درجة حرارة الغاز الكلية عن طريق حساب درجة حرارة إثارة excitation temperature غاز أول أكسيد الكربون CO. غاز أول أكسيد الكربون يحتوي على عزم قطبي dipole moment صغير ، يبلغ تقريبا 0.1 Debye ، وهذا يؤدي إلى إثارة excited بسهولة.
ففي حالة شدة intensity قليل الكثافة الضوئية optically thin من مستوي الدوران J=1-0 و J=2-1 يمكن حساب درجة حرارة إثارة CO باستخدام العلاقة التالية :

$$R_{21}= 4 \exp(-11/ T_{ex})$$

حيث R هي النسبة بين شدة خطي الطيف من J=1-0 و J=2-1 ونحصل عليها من الأرصاد الفلكية للطيف. T_{ex} درجة حرارة إثارة CO.
وفي حالة شدة انبعاث ضوئي كثيف optically thick من مستوي الدوران J=1-0 و J=2-1 يمكن حساب درجة حرارة إثارة CO باستخدام العلاقة التالية :

$$R_{21}= \{ \exp(5.5/ T_{ex}) - 1\} / \exp(11/ T_{ex}).$$

الهوامش

1- د. مجدي يوسف أمين " **تأثير الموجات الصدميه علي كيمياء سحابة بين نجمية منكمشة** " رسالة ماجستير جامعة القاهرة 1991

2- د. مجدي يوسف أمين "**انكماش سحابة بين نجمية ممغنطة**" رسالة الدكتوراه جامعة القاهرة 1994

3- د. مجدي يوسف أمين " **مادة ما بين النجوم**" مجلة الكويت العدد عام 1999

4- Magdy Y. Amin et al. 1997 "**The Evolution of Charged Particles in a model of contracting cloud**". Earth Moon and Planets ,75,41

5-Magdy.Y. Amin. et al. 1997, "**The Chemical Evolution in a model of Contracting cloud**". Earth Moon and Planets 75,25

6- Magdy.Y.Amin 1996, "**Chlorine bearing molecules in hot and cold interstellar clouds**". Earth Moon and Planets, 73,133

7- Magdy.Y. Amin et al. 1997."**New Chemical models for dense portion of NGC 7023**". Mon. Not. R. Astron. Soc. 290, 347

8- Magdy.Y. amin 1998. "**Gas-phase chemistry of the star forming region W3 IRS4**". Astrophysics and space Science. 360,1-16

9- W.W. Duley and D.A. Williams " **Interstellar Chemistry** " 1984. Academic Press Inc. (London) LTD

10- Dalgarno " **Molecular Astrophysics** " 1985 .ed. G.H.F. Diercksen , W.F. Hubner and P.W. Langhoff. (Reidel) P. 218

11- Magdy.Y.Amin et al. 1994. "**Time dependent chemical study of contracting interstellar clouds I. Nitrogen and Carbon bearing molecules**"., Earth Moon and Planets 69, 95

12- Magdy.Y.Amin et al. 1994. "**Time dependent chemical study of contracting interstellar clouds II. Oxygen and Sulphur bearing molecules**". Earth Moon and Planets, 69, 113.

13- Magdy.Y.Amin et al. 1994. "**Time dependent chemical study of contracting interstellar cloud III. The charge distribution in interstellar clouds"**. Earth Moon and Planets , 69,127

14- Millar T.J. 1991. " **phosphorus chemistry in dense interstellar clouds "** Astronomy and Astrophysics 242,241-246

15- Thorne L.R. et al. 1984. "**The chemistry of phosphorus in dense interstellar clouds".** Astrophysical journal 280, 139-143

16- Greenberg J.M. and Pirronello,V. 1991. " **Chemistry in space**". Series C : Mathematical and physical Science – vol 323. NATO ASI Series. Kluwer academic publisher.

17- Dyson J.E. and Williams D.A. 1980. "**Physics of the Interstellar Medium"** John Wiley and Sons

18- van Dishoeck E. 1998. " **The Chemistry of Diffuse and Dark Interstellar Clouds".** Leiden observatory.

19- van Dishoeck E. and Blake G.A. 1998. " **Chemical Evolution of Star-forming Regions**". Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, volume 36.

20- Brad J.E. and Humiston G.E. 1990. "**General Chemistry Principles and Structure**".

21- Holanbach D.J. and Thronson 1987. "**Interstellar Processes**". Kluwer Academic Publisher. Dordrecht . the Netharlands.

22- van Dishoeck E. 1997. "**Molecules in astrophysics : Probes and Processes**". IAU 178.

22- Vardya M.S. and Tarafdar S.P. 1987. "**In Astrochemistry**" . Kluwer Dordrecht

23- Millar T.J. and Williams D.A. 1988. "**in Rate Coefficients in Astrochemistry** " . Kluwer Dordrecht

24- Winnewisser G and Pelz G.H. 1995. "**in Physics and Chemistry of Interstellar Clouds** " . Springer Berlin

25- Lada C.J. and Kyafis N.D.1999. "**The physics of star formation and early stellar evolution II**". dordrecht: Kluwer

26- Turner J.L. and Dalgarno A. 1977. " **The Chemistry of Silicon in Interstellar Clouds**". Astrophysical journal 212, 368-389

27- Langer W.D. and Glassgold A.E. 1990 " **Silicon Chemistry in Interstellar Clouds**". Astrophysical journal 352, 123-131.

28- Langer W.D. 1983 "**Physical and Chemical Properties of Molecular Clouds**". R.Lucas, A. Omont and R. Storo, eds. Les Houches, Session XLI.

المصطلحات العلمية

أ	
اتحاد كيميائي	Chemical recombination
أتربة كونية	Cosmic dust
اتزان حراري	Thermal equilibrium
احتراق الأكسجين	Oxygen burning
احتراق السليكون	Silicon burning
احتراق غلاف الهليوم	Shell helium burning
احتراق فجائي مصحوب بفرقعة	Deflagration
احتراق الكربون	Carbon burning
احتراق النيون	Neon burning
احتراق الهليوم	helium burning
احتمالية الانتقال	Transition probability
إخماد بين نجمي	Interstellar extinction
ارتباط مشع للطاقة	Radiative attachment
الإزاحة نحو الأحمر	Red shift
الإزاحة نحو الأزرق	Blue shift
استقطاب الضوء	Polarization of light
أسر النيوترون	Neutron capture
إشعاع تحت الأحمر	Infrared radiation
إشعاع جاذبية	Gravitational radiatio
إشعاع الخلفية الكونية	Cosmic background radiation
إشعاع كهرومغناطيسي	Electromagnetic radiation
الإشعاع فوق البنفسجي	Ultraviolet radiation
أشعة أكس	X Rays
أشعة جاما	Gama rays
أشعة رونتجن	Roentgen
الأشعة الكونية	Cosmic rays
الإعتام العام	General obscuration
الاقتران	Coupling
التئام / اتحاد	Recombination
إلكترون	Electron
إلكترون فولت	Electron volt
امتصاص	Absorptio
انبعاث	Emission
الانتشار الإشعاعي	Radiative diffusion
انتقال الشحنة	Charge transfer
اندماج نووي حراري	Hermonuclear fusion
الاندماج النووي	Nuclear fusion
انفجار سوبرنوفا	Supernova explosion
الانفجار العظيم	Big-Bang
الأنواع الطيفية	Spectral class
اهتزازة /ذبذبة النيوترينو	Neutrino oscillation
ب	
بايون	pion

البروتون	Proton
بقايا فوق متجدد	Supernova remnant
بقعة شمسية	Suns pot
بلازما	Plasma
بوزيترون	Positron
بوليميرات	Polymers
ت	
تأثير الاحتباس الحراري	Green house effect
تأثير دوبلر	Doppler effect
تأثير زيمين	Zeeman effect
التاو	Tau
التأين	
التأين بالفوتونات	Photo –ionization
تبريد بالإشعاع	Radiation cooling
تبريد بالجزيئات	Molecular cooling
التتابع الرئيسي	Main sequence
تجمع المجرات	Galactic clusters
التحليل الطيفي	Spectral analysis
تردد	Frequency
تشتت ريلاي	Rayleih scattering
تشتت غير انتقائي	Nonselective scattering
تشتت مي	Mie scattering
تشويش	Perturbing
تعدد الجزيئات	

	Population
تفاعل إدراج	Insertion reaction
تفاعل انتقال الشحنة	Charge transfer
تفاعل أيون جزيء	Ion –molecule reaction
تفاعل تكثيف	Condensation reaction
تفاعل ثلاث جسيمات	Three body reaction
تفاعل جسيمين متعادل	Neutral neutral reaction
تفاعل نووي حراري	Thermonuclear reaction
تفاعلات ألفا الثلاثية	The triple alpha reaction
تفاعلات الكربون	Carbon –bearing reaction
تفاعلات كيميائية	Chemical reactions
تفجر /انفجار	Detonatio
تفكك تصادمي	Collisional dissociation
تفكك ضوئي-فوتوني	photo dissociation
التفكك الاتحادي	dissociative recombination
تكونات على سطح الغبار	Grain surface formation
التوصيل	Conduction
تيار الحمل	Convectio
ث	
ثبات الطاقة	Conservation of energy
ثقب أسود	Black hole

ج	
الجاذبية	Gravity
جاوس	Gauss
جزئ	Molecule
الجسم الأسود	Black body
جسيم	Particle
جسيم ألفا	Alpha particles
جو الشمس	Solar atmosphere
جول	Joule
الجيل الأول من النجوم	Early stars
ح	
حاجز التنشيط	Activation barrier
حاجز طاقة قوي	Substantial of energy barriers
حاجز كولومي	Coulomb barrier
حالة التحلل	Degenerate state
الحالة المتعادلة	Neutral state
الحمل	Convection
الحيود	Degeneracy
خ	
خط بالمر	Balmer line
الخط الطيفي	Spectral line
د	
دالة اللمعان	Luminosity function
درجة حرارة العتبة	Threshold temperature

الدفق	Flux
دورة بروتون-بروتون	Proton proton cycle
ذ	
ذات الكرسي	Cassiopeia
ذبذبة	Frequency
ذرة	Atom
رياح شمسيه	solar wind
س	
سحابة أورايون	Orion
سديم بثي	Emission nebula
سديم كوكبي	Planetary nebula
سديم معتم	Dark nebula
سرعة الضوء	Light speed
السرعة	Velocity
السرعة القطرية	Radial velocity
سكة اللبانة	Milky way
سلسلة باش	Paschen series
سلسة بالمر	Balmer Series
سلسلة ليمان	Lyman series
سماء	Sky
ش	
شكل هابل	Hubbell diagram
شكل هيرتزبرنج-راسل	Hertzsprung-Russell diagram
ص	
الصفر المطلق	

ض
الضباب Hazz
الضغط الحيودي للإلكترون Degenerate - electron pressure
الضوء المرئي Visible light
ط
طارد للحرارة Exothermic
طاقة اتجاهيه نووية Nuclear oreintation energy
طاقة إلكترونية Electronic energy
طاقة اهتزازية Vibrational energy
طاقة حرارية Thermal energy
طاقة الحركة Kinetic energy
طاقة دورانية Rotational energy
طاقة الوضع Potential energy
الطول الموجي Wave length
طيف خطى إنبعاثي Emission line spectrum
طيف كهرومغناطيسي Electromagnetic spectrum
الطيف Spectrum
الطيف الخطي الامتصاصي Absorption line spectrum
الطيف المستمر Continuous spectrum
ظ
ظاهرة دوبلر Doppler effect

ع
العدد الذرى Atomic number
عرض التصادم Collisional broadening
عرض خط الطيف Spectral broadening
عزم قطبي Dipole moment
علاقة زمن الدورة واللمعان Period-luminosity relation
علاقة الكتلة واللمعان Mass-luminosity relation
علاقة الكتلة ونصف القطر Mass-radius relation
علم الطيف Spectroscopy
عملاق Giant
عملاق أزرق Blue super giant
عملاق أحمر Red giant
عمليات إعادة التكوين Rearrangement processes
عمليات التكوين Formation processes
عمليات التكسير Destruction processes
عملية ثلاثية ألفا Triple alpha process
العناصر الثقيلة Heavier elements
عنصر Element
غ
غاز Gas
غلاف الحمل Convective envelope
غلاف النجم المحيط Circumstellar shell
الغلاف الجوي الأرضي Earth atmosphere

الغلاف الجوي النجمي Stellar atmosphere
ف
فترة الاتحاد Recombination epoch
الفصل الكيماوي Chemical differentiation
Space فضاء
Association الفك الترافقي detachment
الفوتوسفير / سطح الشمس النير photosphere
Photon الفوتون
Super giant فوق عملاق
Supernova فوق متجدد
Energy flux فيض الطاقة
ق
Proton affinity القابلية البروتونية
قاعدة اللادقة لهايزنبرج Heisenberg uncertainty principle
Wein قانون إزاحة فن displacement
Stefan- قانون ستيفان بولتزمان Boltzman law
Kirchoff law قانون كيرشوف
القدر الظاهري Apparent magnitude
Absolute magnitude القدر المطلق
قزم أبيض White dwarf
Brown dwarf قزم بني
Centaurus قنطورس
قوانين الحركة لنيوتن Newton's laws of motion
Force القوة

ك
Mass الكتلة
الكثافة المتوسطة Average density
Cosmology الكسمولوجي
Kelvin كلفن
كمية الحركة Angular momentum
Quark كوارك
Universe الكون
Early universe الكون البدائي
ل
Lepton لبتون
Core helium burning لب الهليوم المحترق
Shell hydrogen burning لب الهيدروجين المحترق
Luminosity of the sun لمعان الشمس
م
Endothermic ماص للحرارة
polyatomic متعدد الذرات
Cepheid variabl متغير قيفاوى
Filters مرشحات
Continuum مستمر / متواصل
Ground state مستوى الخمود
Energy level مستوى الطاقة
Equations of stellar structure معادلات تركيب النجوم
معامل سرعة التفاعل Reaction rate coefficient
منطقة إشعاعية Radiative zone
Convective zone منطقة الحمل

موجات جاذبية Gravitational waves
الموجات الراديوية Radio waves
الموجات الميكروويف Microwaves
موجة صدمية Shock wave
ميكانيكا الكم Quantum mechanics
ميكانيكا نيوتن Newtonian mechanics
ميون Muon
ن
نجم التتابع الرئيسي Main sequence star
نجم جنين Proto star
نجم غني بالمعادن Metal-rich star
نجم كربوني Carbon star
نجم نيوتروني Neutron star
نجوم باردة Cooled stars
نجوم التتابع الرئيسي صغيرة العمر Zero-age main sequence (ZAMS)
نجوم شابة Young stellar object
نظرية الحركة Kinetic theory
نظرية الكم Quantum theory
نظرية النسبية العامة General theory of relativity
نظير Isotope
النواة Nucleus
نوع الطيف Spectral type
النيوترون Neutron
نيوترينو Neutrino

هـ
هادرونات Hadrons
هيدروكربونات Hydrocarbons
و
وسط بين نجمي Interstellar medium
وميض الهليوم Helium flash